N° d'ordre : 72

Année 1977

THÈSE

PRÉSENTÉE

À L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

POUR OBTENIR

LE DIPLÔME DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Hervé BONHOMMET
Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Physique

ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN DISPOSITIF AUTOMATIQUE DE FILTRAGE MULTICANAL

SOUTENUE LE 7 JUIN 1977, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM. J.-Ch. VIENOT	Professeur à l'Université de Besançon	Président
P. BOUSQUET	Directeur de l'École Nationale Supérieure de Physique	Examinateurs
P. PARDO	Directeur Délégué aux Automatismes de la Régie Nationale des Usines Renault	Examinateurs
J. BULABOIS	Professeur à l'Université de Besançon	

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546611_0008

N° d'ordre : 72

Année 1977

THÈSE

PRÉSENTÉE

À L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

POUR OBTENIR

LE DIPLÔME DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

Hervé BONHOMMET

Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Physique

ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN DISPOSITIF AUTOMATIQUE DE FILTRAGE MULTICANAL

SOUTENUE LE 7 JUIN 1977, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM. J.-Ch. VIENOT	Professeur à l'Université de Besançon	Président
P. BOUSQUET	Directeur de l'École Nationale Supérieure de Physique	Examinateurs
P. PARDO	Directeur Délégué aux Automatismes de la Régie Nationale des Usines Renault	Examinateurs
J. BULABOIS	Professeur à l'Université de Besançon	

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

UNIVERSITE DE BESANCON

Président : Monsieur LEVEQUE Pierre

FACULTE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

DOYEN

Mr GALATRY Louis : Physique Moléculaire
Professeur

ASSESSEURS

Mr BLAISON Jean : Géologie-Minéralogie
Maître-Assistant
Mr PARIZET Jean : Mathématiques
Professeur

PROFESSEURS

Mrs CHATELET François : Mathématiques
MESNAGE Pierre : Chronométrie
PERROT Roger : Chimie Générale
PLUVINAGE Philippe : Physique Théorique
CHALEAT Raymond : Mécanique Appliquée
BERNARD Jean : Chimie-Physique
RIPPLINGER Jean : Physiologie Animale
GREMILLARD Jean : Mathématiques
VIENOT Jean Charles : Physique Gle Optique
THIEBAUT Jean : Pétrographie-Minéralogie
GOMOT Lucien : Zoologie et Embryologie
THEOBALD J. Gérard : Spectroscopie Hertzienne
CERUTTI Ernest : Chimie Appliquée
DEVIN Claude : Chimie 1et cycle
CAPODANNO Pierre : Mécanique Théorique
BANTEGNIE Robert : Mathématiques
ROBERT Danial
ROBERT Jacques
CHAUVE Pierre
RANGEARD Yves
BIDAULT Michel

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Mrs POTIER Robert : Physique des Solides
REAL Pierre : Ecologie Animale
GOUARNE René : Mathématiques
MERIGOUX Henri : Cristallographie et synthèses minérales
OLIVIER Marcel : Electronique Quantique
MONTAGNER Hubert : Psychophysiologie
BULABOIS Jean : Physique Gle Optique
GAUDEMER Yves : Biochimie
LAUDE Nernard : Chimie Organique
MIELLOU Jean Claude : Analyse Numérique
ROBERT Guy : Electrochimie

DOYENS HONORAIRES

Mrs GLANGEAUD, JACQUEMAIN, CHATELET, THIEBAUT, BERNARD

PROFESSEURS HONORAIRES

Mrs BAILLAUD, THIRY, TRILLAT, UEBERSFELD, VINCENSINI, TRONCHET THEOBALD N.. QUANTIN

MAITRE DE CONFERENCE HONORAIRE

Mr GRANIER

MAITRES DE CONFERENCES

Mrs DUBOUCHET Jacques : Botanique
WEIL Michel : Mathématiques
BROQUET Paul : Géologie
GRAS Georges : Mathématiques
TREHEL Michel : Informatique
MILLET Bernard : Botanique
BENILLAN Philippe : Mathématiques
COUGNARD Jean : Mathématiques
LACOSTE Alain : Biol. et Physio. Végét.

RESPONSABLE DES SERVICES ADMINISTRATIFS

Mr RUNGE Jean-Marie

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Physique Générale et Optique, dans le cadre d'une allocation de recherche du C.N.R.S.

Je tiens avant toute chose à exprimer mes remerciements à ceux qui en ont permis l'aboutissement.

Je m'adresse tout d'abord à Monsieur le Professeur VIENOT qui, après m'avoir accordé sa confiance totale, puis m'avoir fait bénéficier de ses précieux conseils, principalement lors de la rédaction du manuscrit, me fait l'honneur de présider le jury. Je lui en suis infiniment reconnaissant.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur le Professeur BOUSQUET, qui a si spontanément accepté de quitter le soleil méridional pour venir examiner le travail d'un de ses anciens élèves.

Monsieur PARDO, avec qui j'ai maintenant le plaisir de collaborer, a su se libérer quelques temps de ses importantes fonctions pour me faire part de ses critiques, montrant ainsi l'intérêt qu'il porte à l'université. Je tiens à lui en exprimer ma vive reconnaissance.

Monsieur le Professeur BULABOIS me fait l'honneur de s'intéresser à mon travail en acceptant de le juger. Que ces quelques mots soient pour lui un témoignage de ma gratitude.

Mes profonds remerciements vont également à l'ensemble du personnel du Laboratoire qui m'a fait profiter de sa grande compétence et de sa bonne humeur, et plus particulièrement L. BONNOT et A. LIGIER, qui ont eu dans ce travail la part la plus ingrate, sans pour autant perdre le sourire.

A tous donc, merci !

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE FC : FILTRAGE ET CORRELATIONS 3

FC.I. Préliminaires 3

FC.II. Rappel de principe 4

FC.III. Les principales catégories de filtres 5

FC.III.1. Les filtres d'amplitude 5
FC.III.1.a. Les filtres d'amplitude binaires 5
FC.III.1.b. Les filtres atténuateurs 6

FC.III.2. Les filtres de phase 6

FC.III.3. Les filtres complexes 6
FC.III.3.a. Les filtres synthétiques 6
FC.III.3.b. Les filtres-hologrammes 7

FC.IV. Traitement des images par filtrage d'amplitude des fréquences spatiales 7

FC.V. Application des filtres-hologrammes à la corrélation 9

FC.VI. Filtrage multicanal 10

CHAPITRE AM : ETUDE ET REALISATION D'UN APPAREIL MULTICANAL DE FILTRAGE 12

AM.I. Introduction 12

AM.II. Position du problème. Choix du dispositif 13

AM.II.1. Performances souhaitées 13

AM.II.2. Impératifs technologiques 13
AM.II.2.a. Encombrement et poids 13
AM.II.2.b. Dimension et espacement des canaux 14
AM.II.2.c. Précision de positionnement 14

AM.II.3. Schéma général de l'appareil 14
AM.II.3.a. L'unité active 14
AM.II.3.b. L'unité de commande 15

AM.III. Etude du sélecteur de canaux 15

AM.III.1. Préliminaires 15

AM.III.2. Etude de l'obturateur 16
AM.III.2.a. Synthèse logique de M_x. 18
AM.III.2.b. Synthèse de S_x. 18

AM.IV. Le sélecteur de filtres 19

AM.IV.1. Préliminaires 19

AM.IV.2. Etude de l'automatisme 20
AM.IV.2.a. Synthèse des circuits logiques 21
- S_c 21
- R_c 21
- M_p 22
- M_c 22
- S_p 23

AM.V. Réalisation 23

AM.V.1. Mécanique 23

AM.V.2. Electronique 23
AM.V.2.a. Les circuits logiques 24
AM.V.2.b. Les interfaces 24
- les capteurs 24
- les circuits de puissance 25

AM.V.2.c. Les alimentations 26

AM.V.3. Les interconnexions 26

AM.VI Etude et réalisation des filtres 28

AM.VI.1. Les filtres d'amplitude 28
AM.VI.1.a. Caractéristiques souhaitées 28
AM.VI.1.b. Méthode de réalisation 28
AM.VI.1.c. Données numériques 29
AM.VI.1.d. Types de filtres réalisés 30

AM.VI.2. Les filtres-hologrammes 30

AM.VII. Présentation générale et mode d'utilisation 31

CHAPITRE GM : APPLICATION DES GRILLES MULTIPLICATRICES AU FILTRAGE MULTICANAL 34

GM.I. Introduction 34

GM.II. Principe de la multiplication à l'aide de grilles périodiques 34

GM.II.1. Cas général 34

GM.II.2. Cas où $g(x,y) = g_x(x)\, g_y(y)$ 36

GM.III. Problème de l'égalisation des termes 36

GM.III.1. Position du problème 36

GM.III.2. Cas des grilles à profil sinusoïdal 38

GM.III.3. Cas des grilles à profil en créneaux 40

GM.III.4. Recherche de la solution maximale 42

GM.IV. Réalisation des grilles multiplicatrices en vue de leur utilisation avec l'appareil multicanal de filtrage 44

GM.IV.1. Méthode systématique 44

GM.IV.2. Méthode empirique 46

GM.V. Conclusion du chapitre 48

CHAPITRE SH : SYNTHESE HARMONIQUE DE FONCTIONS PERIODIQUES 49

SH.I. Introduction 49

SH.II. Principe 49

SH.III. Exemple d'application : synthèse de la fonction échelette 51

SH.IV. Résultats divers 53

SH.V. Conclusion 54

CONCLUSION GENERALE 55

ANNEXE I Projet d'obturateur multiple fonctionnant à l'aide de cristaux liquides

ANNEXE II Le blanchîment des émulsions photographiques

ANNEXE III Plans des éléments mécaniques de l'unité active de l'appareil multicanal

ANNEXE IV Brochage des circuits intégrés

INTRODUCTION GENERALE

Si le filtrage des fréquences spatiales apparaît relativement récent - tout au plus une vingtaine d'années, une dizaine si l'on pense aux progrès considérables encore réalisés par l'introduction des filtres-hologrammes - l'exemple le plus ancien de filtrage semble être, le Foucaultage, du nom de son inventeur, et date de 1850 environ. Cette technique utilisée alors pour le contrôle de la qualité des objectifs et miroirs, était purement empirique. La mise en évidence de l'aberration sphérique se justifiait facilement, mais la détection de bulles et micro-cassures n'avait pas à cette époque d'explication satisfaisante. En améliorant la méthode, TOPLER inventa un procédé d'examen des "stries", la strioscopie, reprise plus tard par GOUY à la fin du XIXème siècle. Il fallut cependant attendre 1900 pour qu'avec les travaux d'ABBE apparaisse la notion de termes spectraux (x). En 1934, ZERNIKE utilise un filtre déphasant pour la microscopie en contraste de phase. En 1946, P.M. DUFFIEUX publie la mise en forme des équations de diffraction en termes de transformation de Fourier. C'est enfin l'apparition du laser et de l'holographie qui ont permis aux années 60 de faire progresser de façon spectaculaire les techniques de filtrage. C'est à cette époque que sont nées les méthodes optiques de reconnaissance de forme. Parallèlement, les applications au traitement des images n'ont cessé de s'améliorer, au profit des astronomes et des spécialistes des communications spatiales. Les méthodes utilisées - corrélation, suppression de bruits, soustraction d'images, codages et décodages - sont toutes basées sur les riches propriétés de la transformation de Fourier. Cependant ces opérations n'ont pas toujours dépassé le stade de l'expérience de laboratoire,

(x) ce qui correspond dans le langage actuel aux fréquences spatiales. Cette notion s'applique aussi bien à un continuum qu'à un ensemble discret de termes.

bien que bon nombre d'études aient abouti à des résultats très encourageants. Par ailleurs, la possibilité de multiplexage du filtrage a fait l'objet de différents travaux, et plusieurs prototypes ont pu être réalisés.

Dans sa thèse sur les grilles multiplicatrices, J.L. TRIBILLON a proposé l'utilisation de ces dernières pour obtenir simultanément les N spectres nécessaires à un multiplexage en parallèle. Un schéma de corrélateur multicanal a ainsi été défini, et c'est à la réalisation d'un tel appareil que les travaux présentés ici sont principalement consacrés.

Cependant, entré au Laboratoire sans formation particulièrement spécialisée dans la pratique de l'optique, j'ai eu l'occasion, au cours d'une période d'assimilation, de me familiariser avec différents aspects de l'optique d'aujourd'hui. Ceci m'a d'ailleurs conduit à entreprendre quelques travaux qui ne sont que brièvement rappelés dans la thèse, et constitueront la matière d'autres publications. Un projet de méthode de réalisation de grilles multiplicatrices et un projet d'obturateur multiple fonctionnant avec des cristaux liquides en sont deux illustrations.

Bien que non chronologique, la structure du présent mémoire tend à suivre un ordre logique. Tout d'abord, un rappel sur le filtrage, illustré de quelques exemples d'applications pratiques, montre l'utilité de la réalisation d'un dispositif automatique adapté au filtrage multicanal. L'étude et la réalisation d'un tel appareil sont présentées au chapitre suivant. La méthode utilisée pour l'obtention des canaux n'est pas traitée dans cette partie, mais donne lieu à tout un chapitre consacré aux grilles multiplicatrices, où sont rapportés les résultats de quelques travaux sur ce sujet. Ce manuscrit s'achève par un chapitre sur la synthèse harmonique en optique, figurant comme une application possible des grilles multiplicatrices.

C H A P I T R E F.C.

FILTRAGE ET CORRELATION

FC.1. PRELIMINAIRES

Ce chapitre ne saurait être considéré comme le fruit de recherches personnelles. Il ne présente rien de nouveau en matière de filtrage. Son but est de démontrer l'intérêt de la réalisation d'un appareil automatique de filtrage multicanal, en s'appuyant sur de nombreux exemples d'applications.

Après un rappel succinct du principe de base des méthodes de Fourier, deux grandes classes de filtrage sont présentées, en insistant surtout sur leurs applications à des problèmes concrets. Il s'agit du filtrage d'amplitude binaire, et de la corrélation par filtrage complexe. Pour les aspects théoriques, qui ne sont évidemment pas développés ici, il est bon de se reporter à l'un des principaux ouvrages sur les méthodes de Fourier en optique (FC.1,2,3). Ce chapitre s'achève par la présentation du filtrage multicanal, en donnant une première ébauche de l'appareil dont l'étude complète et la réalisation font l'objet du second chapitre.

FC.II. RAPPEL DE PRINCIPE

Les opérations de filtrage de Fourier s'effectuent à l'aide de montages optiques à double diffraction, dont les trois types principaux sont représentés à la figure FC.1. Ce sont tous des systèmes de formation d'image, utilisant une source ponctuelle S (cohérente ou non), conçus de telle façon qu'il existe une image réelle S' du point-source entre l'objet O et son image O'.

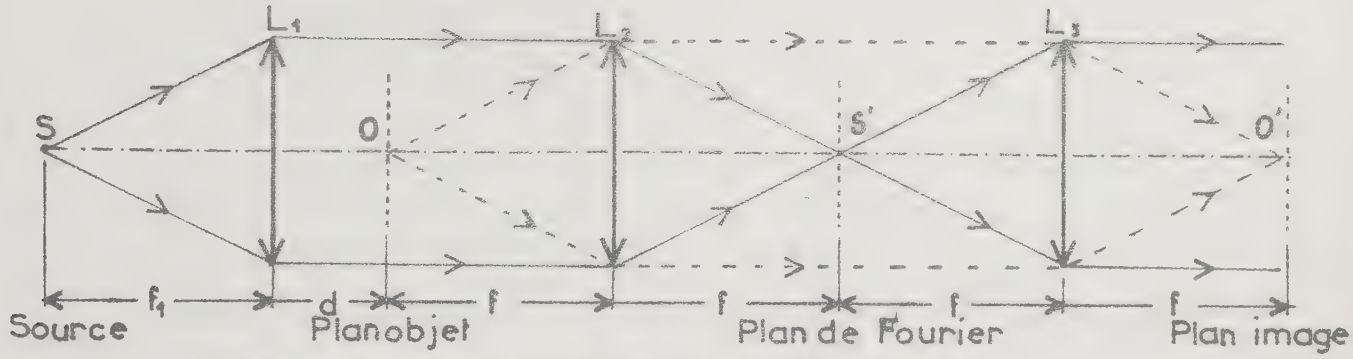
En éclairage monochromatique, et si l'objet[(x)] dont on veut former une image tient lieu de pupille du système formant l'image S', la fonction qui décrit cette dernière n'est autre que la transformée de Fourier de la fonction objet, c'est à dire son spectre. Ce dernier, comme toute répartition lumineuse présente entre l'objet et son image, est une distribution spatiale de l'information contenue dans l'objet.

Il est aisément concevable que toute perturbation apportée au cheminement des rayons lumineux se traduira par une modification de l'image. Cependant, la relation de transformation de Fourier qui existe entre la fonction objet et le spectre fait que celui-ci a une structure très particulière qui permet de prévoir souvent sans aucun calcul l'influence de la perturbation apportée. En effet, si l'objet est décrit par des variables d'espace, le spectre l'est par des fréquences spatiales, notion que l'exemple simple d'une mire périodique explicite de façon évidente.

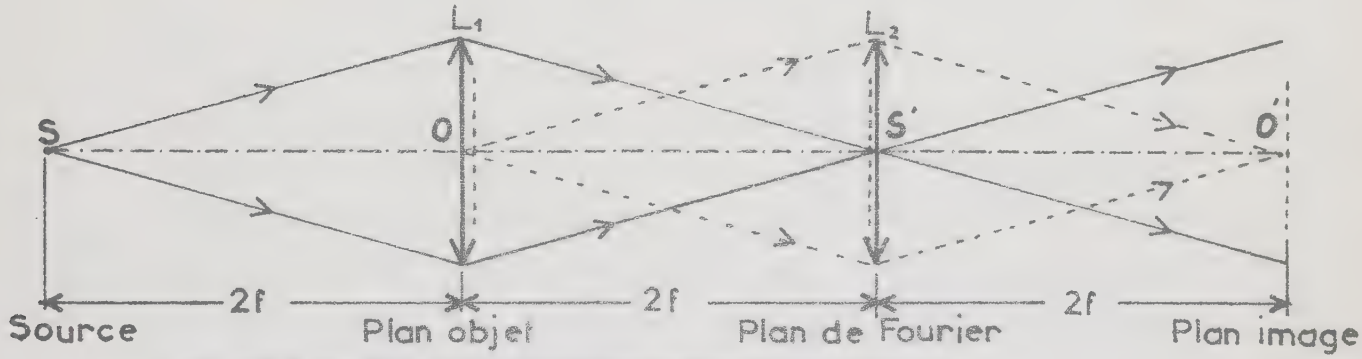
Cette dernière est décrite par une transmittance décomposable en série de Fourier sous forme de termes sinusoïdaux dont les fréquences spatiales sont multiples de la fréquence fondamentale. Son spectre est une distribution de points équidistants et alignés, dont l'amplitude est proportionnelle au terme correspondant de la série de Fourier[(xx)].

[(x)] Dans tout le manuscrit, on appelle objet une répartition bidimensionnelle de transmittance, que l'on définit comme le rapport de deux amplitudes complexes. La fonction décrivant un objet est donc de la forme $o(x,y) = a(x,y)\, e^{j\phi(x,y)}$ où a est le module et ϕ la phase.

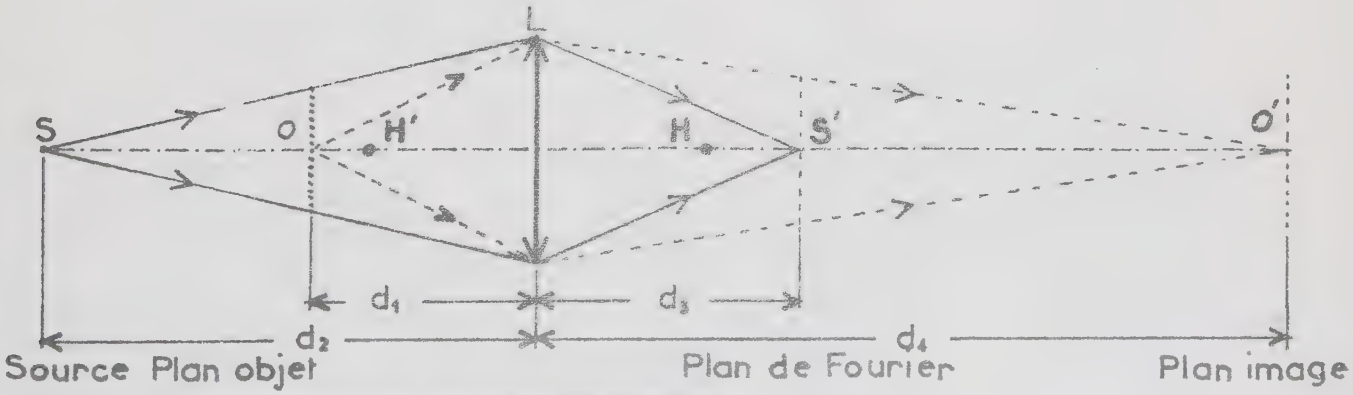
[(xx)] Voir à ce sujet le chapitre SH qui s'intéresse plus particulièrement aux objets périodiques.



MONTAGE A 3 OBJECTIFS (dit "4f")



MONTAGE A 2 OBJECTIFS (dit "6f")



MONTAGE A 1 OBJECTIF

FIGURE FC 1 : Les principaux montages optiques utilisés en filtrage par double diffraction.

Ainsi, dans un cas beaucoup plus général, la présence de points lumineux symétriques dans le spectre traduit l'existence d'une structure périodique dans l'objet.

Une autre particularité intéressante est la mise en évidence de structures directionnelles, qui se manifestent par un renforcement radial du spectre. Afin d'illustrer clairement ces phénomènes, la figure FC.2 réunit quelques objets et leurs spectres et montre le lien existant entre les caractères périodiques ou directionnels et l'aspect du spectre.

C'est donc en perturbant le faisceau lumineux dans le plan spectral que sont réalisées les opérations de filtrage de Fourier. Pour cela, on utilise un filtre qui se présente dans le cas général sous forme d'une transparence. Mathématiquement, cela revient à multiplier le spectre par une fonction filtre, c'est à dire à effectuer le produit de deux fonctions complexes. Il existe une très grande variété de configuration de filtres. Nous présentons ci-dessous les principales, ainsi que le type de filtrage auquel ils sont appliqués généralement.

FC.III. LES PRINCIPALES CATEGORIES DE FILTRES

FC.III.1. Les filtres d'amplitude

Dans un filtrage d'amplitude, seul le module du spectre est modifié. Les filtres utilisés sont donc des densités et ne présentent aucune variation de phase. On en distingue deux sortes : les filtres binaires et les filtres atténuateurs.

FC.III.1.a. Les filtres d'amplitude binaires

Ils ne permettent que de supprimer certaines parties du spectre. Ce sont donc plutôt des caches ou masques. La strioscopie et le foucaultage en sont les plus anciens exemples, mais de nombreuses autres possibilités sont envisageables et sont développées plus loin.

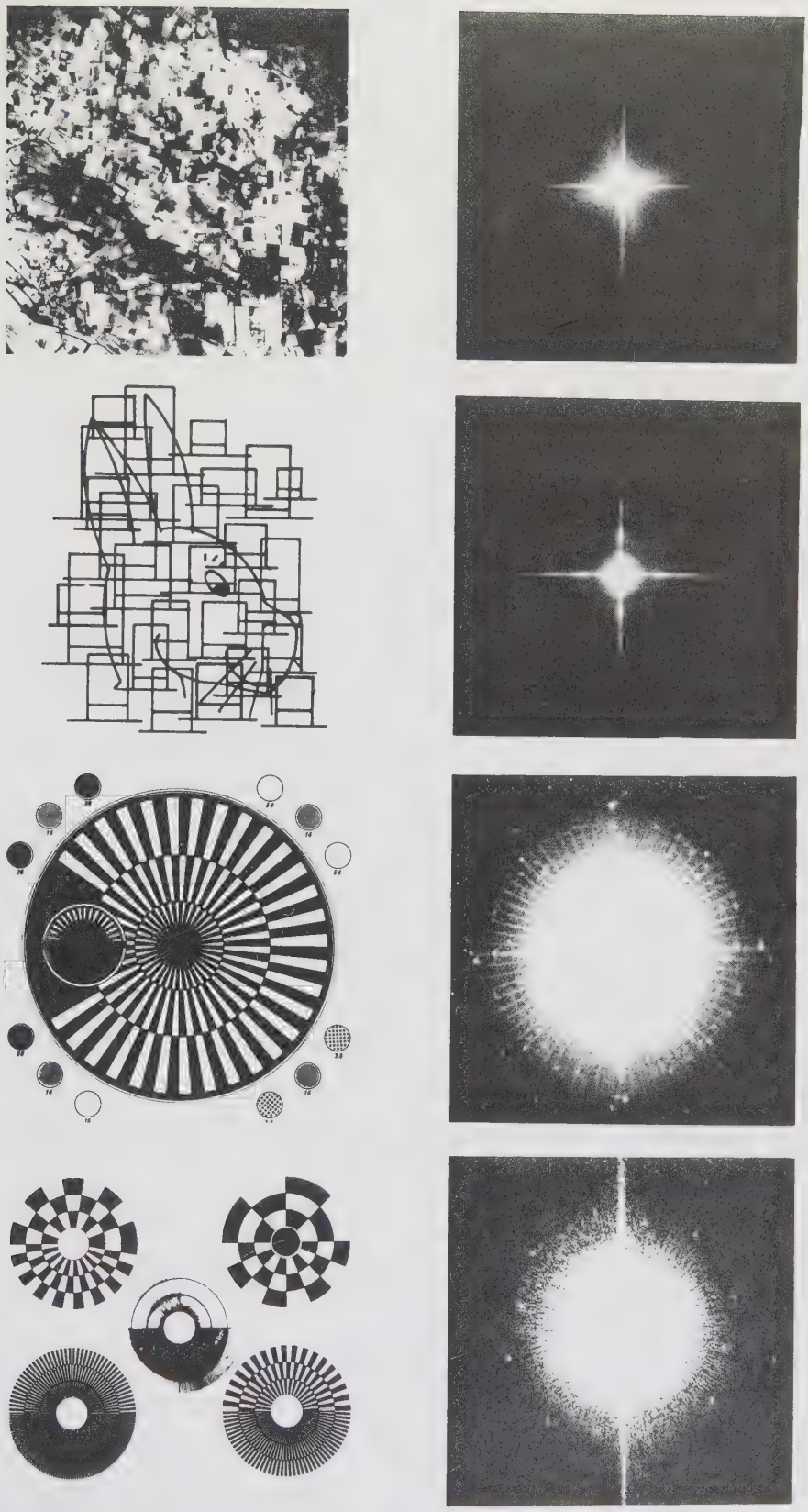


FIGURE FC 2 : Exemples de spectres montrant les caractères périodiques ou directionnels des objets correspondants.

FC.III.1.b. Les filtres atténuateurs

Ces filtres sont destinés à atténuer plus ou moins certaines régions des spectres. Ce sont donc des densités variables qui présentent une certaine loi de filtrage. L'exemple le plus classique de ce type est le filtre compensateur destiné à l'amélioration des images (voir par exemple FC.2, p.177, 185), et qui découle directement des propriétés de la transformation de Fourier.

Une autre application très importante est la réalisation d'opérations de déconvolution, que l'on ne peut appliquer qu'à un nombre de cas très restreint . En effet, une convolution se réalise pratiquement à l'aide d'un filtre dont la transmittance est l'inverse de la fonction de transfert du système. Un tel filtre est rarement réalisable,en particulier lorsque la fonction de transfert présente des 0. De nombreux auteurs intéressés par ce problème ont proposé différentes solutions, qui ne sont que des approches en aucun cas généralisables.

FC.III.2. Les filtres de phase

Dans cette catégorie on ne citera que le contraste de phase (Zernicke, 1934,1938) dont l'application à la microscopie est bien connue (FC.4). Le filtre le plus simple utilisé dans ce type de microscopie est en effet une lame parfaitement transparente, qui ne fait que modifier la phase de certaines fréquences spatiales de l'objet, dans le but de visualiser des détails parfaitement transparents.

FC.III.3. Les filtres complexes

FC.III.3. a. Les filtres synthétiques

Ce sont des filtres complexes, en général assez simples. On les utilise principalement en contraste de phase, où ils présentent l'avantage d'augmenter le contraste par rapport à celui que permet un filtre de phase pure. Ce sont des filtres binaires (transparence 1 et T, phase 0 et $\Pi/2$).

La superposition d'un filtre de phase binaire et d'un

filtre atténuateur permet d'agrandir le champ de l'application aux opérations de déconvolution, en introduisant le signe "-" (par un déphasage de Π).

FC.III.3.b. Les filtres-hologrammes

Ce sont les derniers nés de la famille des filtres. Ils nécessitent pour leur réalisation, l'utilisation d'une source très cohérente, ce qui explique qu'il a fallu attendre l'apparition du laser avant de pouvoir les fabriquer. La possibilité de mise en mémoire de la phase a permis aux travaux sur la déconvolution de franchir un nouveau pas.

Cependant, le plus grand intérêt semble être la possibilité de réalisation de corrélations par moyens optiques, qui est développée par la suite.

FC.IV. TRAITEMENT DES IMAGES PAR FILTRAGE D'AMPLITUDE DES FREQUENCES SPATIALES

Les méthodes présentées dans cette partie sont identiques aux opérations de filtrage effectuées par les électroniciens, mais le caractère unidimensionnel des fonctions temporelles de ces derniers est élargi au cas bidimensionnel de l'espace objet des opticiens. Le principe commun en est la modification de la répartition spectrale de l'énergie à l'aide d'un filtre à atténuation spatialement variable.

Il est aisé de réaliser par les procédés classiques de photographie, des filtres présentant une échelle continue de densité. Malheureusement,leur utilisation en éclairage cohérent nécessite une immersion, à cause des défauts de phase propres aux émulsions photographiques, qui introduisent dans l'image un bruit très important.

C'est pourquoi tous les exemples traités ici font appel à des filtres binaires, dont la densité est 0 ou 1, et qui, sans l'éliminer complètement, atténuent fortement l'effet néfaste apporté par les supports utilisés. Ils ont l'avantage d'être facilement réalisables avec un matériel simple. La figure FC.3 en présente quelques exemples en précisant les grandeurs caractéristiques de chaque type.

L'effet de différents filtrages sur une mire est visible

	passe-haut sans ordre central u_c = fréquence de coupure		coupe-fréquence avec harmoniques u_f = fréquence du fondamental
	passe-haut avec ordre central u_c = fréquence de coupure		coupe-direction sans ordre central θ = orientation/ horizontale $\Delta\theta$ = largeur angulaire
	passe-bas avec ordre central u_c = fréquence de coupure		passe-direction sans ordre central θ = orientation/ horizontale $\Delta\theta$ = largeur angulaire
	passe-bas sans ordre central u_c = fréquence de coupure		passe-direction avec ordre central θ = orientation/ horizontale $\Delta\theta$ = largeur angulaire
	coupe-bande avec ordre central u_c = fréquence centrale Δu = largeur de bande		coupe-direction avec ordre central θ = orientation/ horizontale $\Delta\theta$ = largeur angulaire
	coupe-bande sans ordre central u_c = fréquence centrale Δu = largeur de bande		passe-bande sans ordre central u_c = fréquence centrale Δu = largeur de bande

FIGURE FC3 : les principaux types de filtres de fréquences spatiales. On précise pour chaque filtre les grandeurs qui les caractérisent.

sur les figures FC.4, 5 et 6. La notion de fréquence spatiale y est très nettement mise en évidence, surtout dans le cas du filtrage passe-bande, où sont seules transmises les fréquences, fondamentales ou harmoniques, présentes dans la bande sélectionnée.

Quelques applications de filtrage effectuées sur des photographies aériennes sont présentées sur les planches suivantes. La figure FC.7 montre l'effet d'un filtrage de direction, permettant de supprimer ou au contraire de ne conserver que les détails présentant une orientation privilégiée. Si l'on supprime la partie centrale du spectre par strioscopie, le résultat du filtrage est du type représenté figure FC.8. C'est d'ailleurs ce type de filtrage qui est réalisé au LOBE(x) en collaboration avec une équipe d'historiens, dans le cadre d'une étude systématique des tracés de cadastration romaine subsistant dans le midi de la France(xx). La figure FC.9 montre d'ailleurs la comparaison des résultats obtenus à partir d'un même cliché par la méthode optique (FC.6) et par la méthode manuelle classique (FC.7). La figure FC.10 schématise la possibilité de séparer deux communes adjacentes en se basant sur un critère de différence d'orientation de leurs cadastres respectifs.

Dans l'introduction de ce chapitre, il a été précisé que le spectre d'un objet périodique présentait une structure discrète. Cette particularité peut être utilisée pour mettre en évidence les microstructures périodiques présentes sur un objet. C'est ce qui a permis, comme le montre la figure FC.11, de détecter des zones où figurent des cultures périodiques, passant inaperçues par simple observation du cliché aérien. C'est la présence de points lumineux très intenses loin du centre du spectre qui trahit de façon caractéristique cette particularité.

Une application pratique basée sur ce principe est présentée sur la figure FC.11 bis. Elle consiste à séparer sur un cliché aérien des zones correspondant à différentes variétés de cultures. Ce procédé pourrait permettre une rapide estimation des

(x) LOBE = Laboratoire d'Optique de Besançon.

(xx) Ce travail entre dans le cadre d'une Action Thématique Programmée du C.N.R.S. sur le traitement des images intitulée : Etude morphologique des structures de l'exploitation rurale dans les colonies romaines de la Gaule antique - 1974-1976.

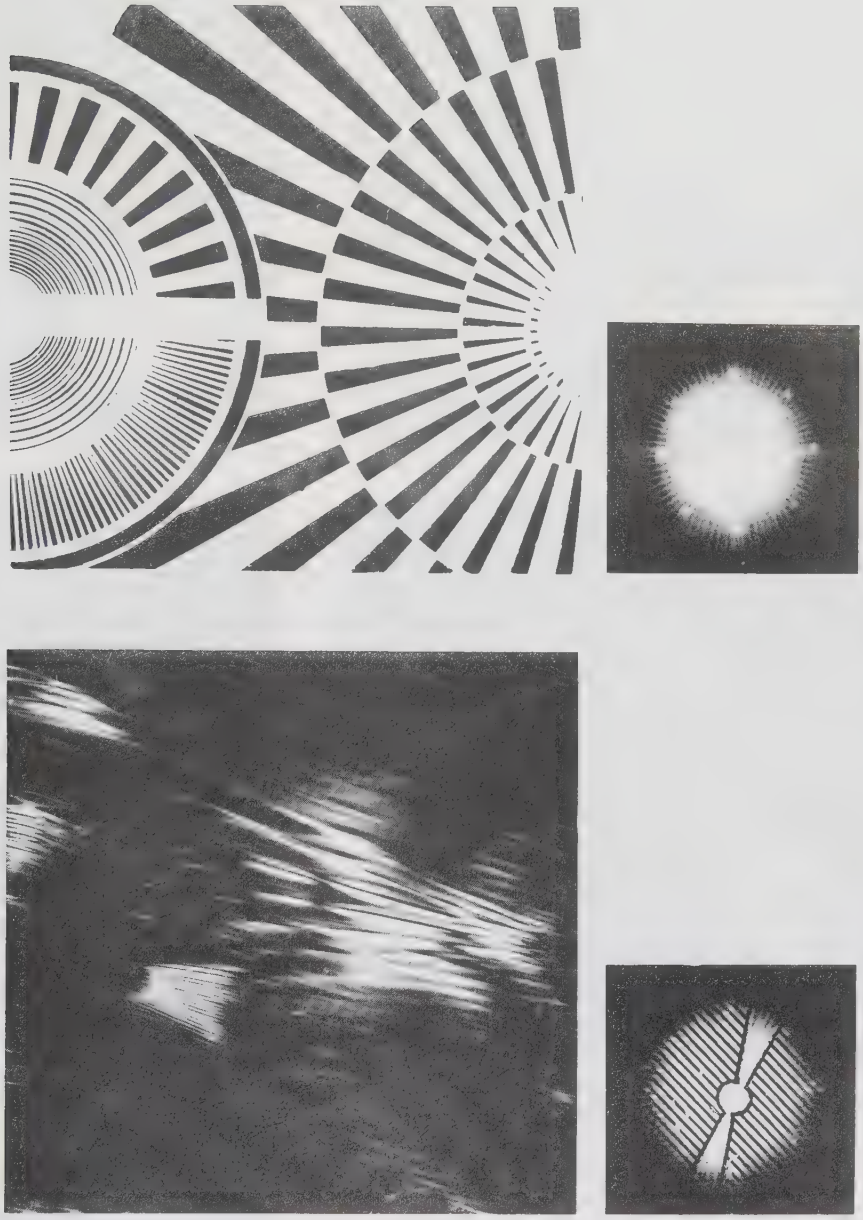


FIGURE FC4 : effet d'un filtrage de direction avec suppression de l'ordre central sur une mire.

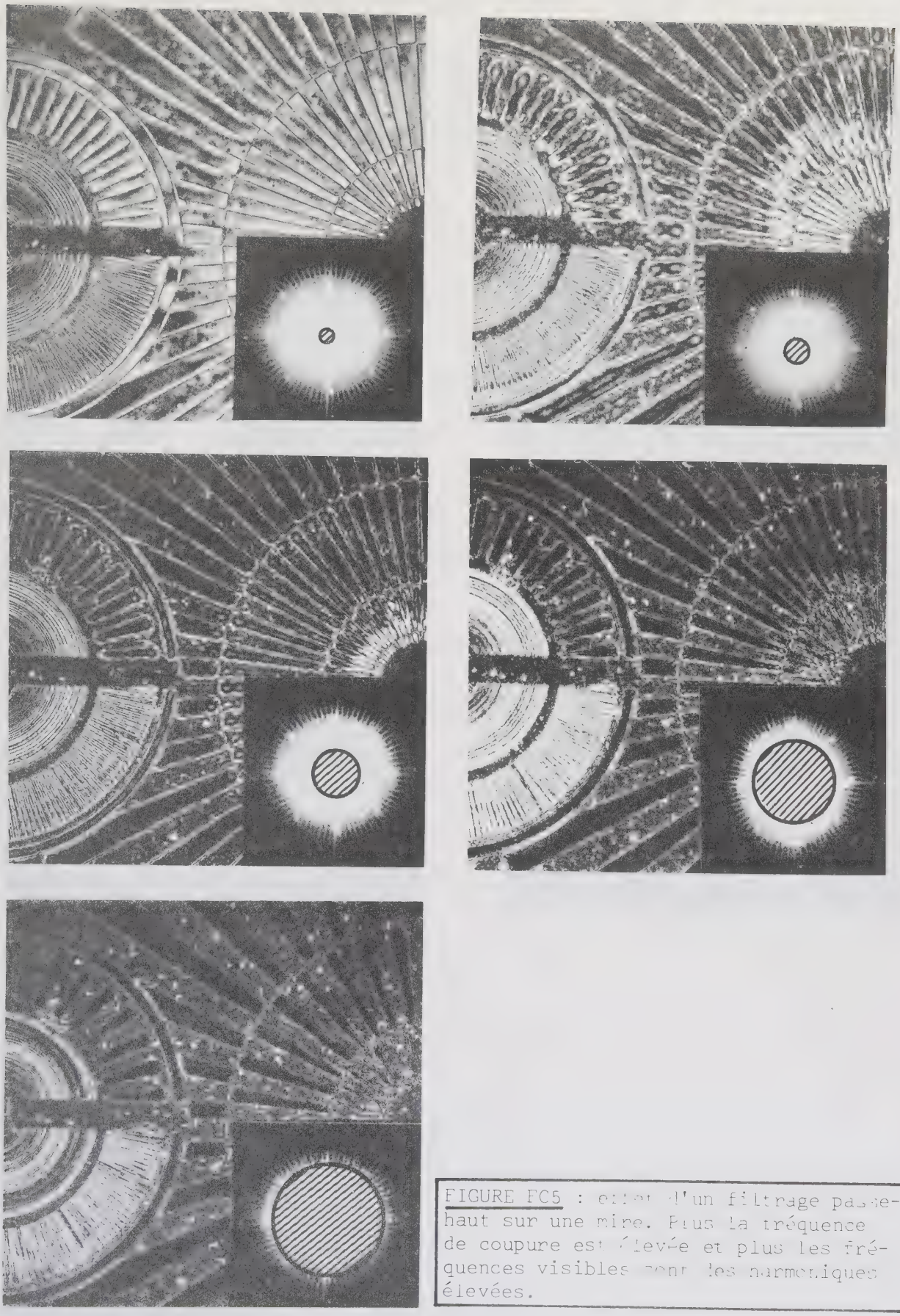


FIGURE FC5 : effet d'un filtrage passe-haut sur une mire. Plus la fréquence de coupure est élevée et plus les fréquences visibles sont les harmoniques élevées.

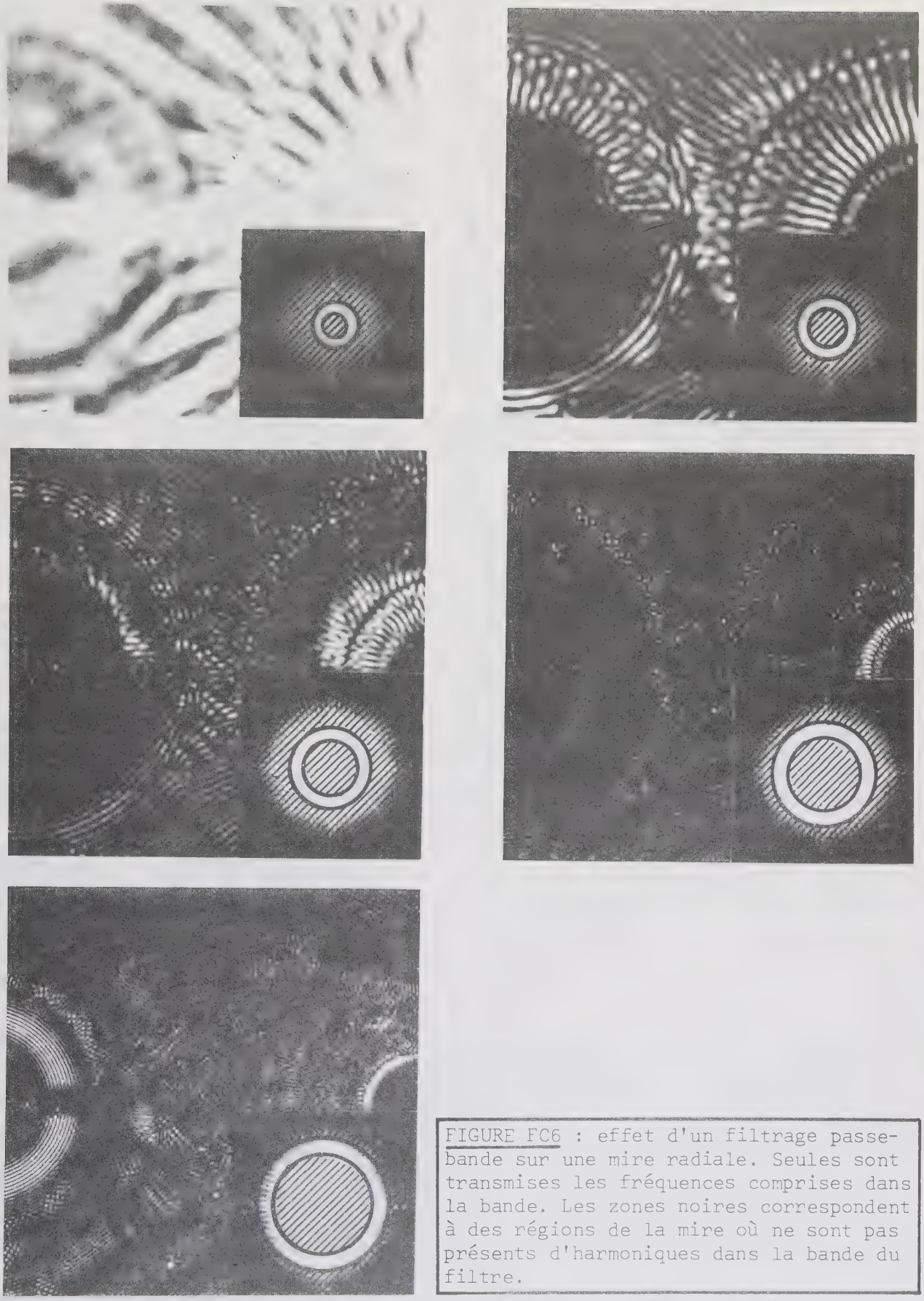


FIGURE FC6 : effet d'un filtrage passe-bande sur une mire radiale. Seules sont transmises les fréquences comprises dans la bande. Les zones noires correspondent à des régions de la mire où ne sont pas présents d'harmoniques dans la bande du filtre.

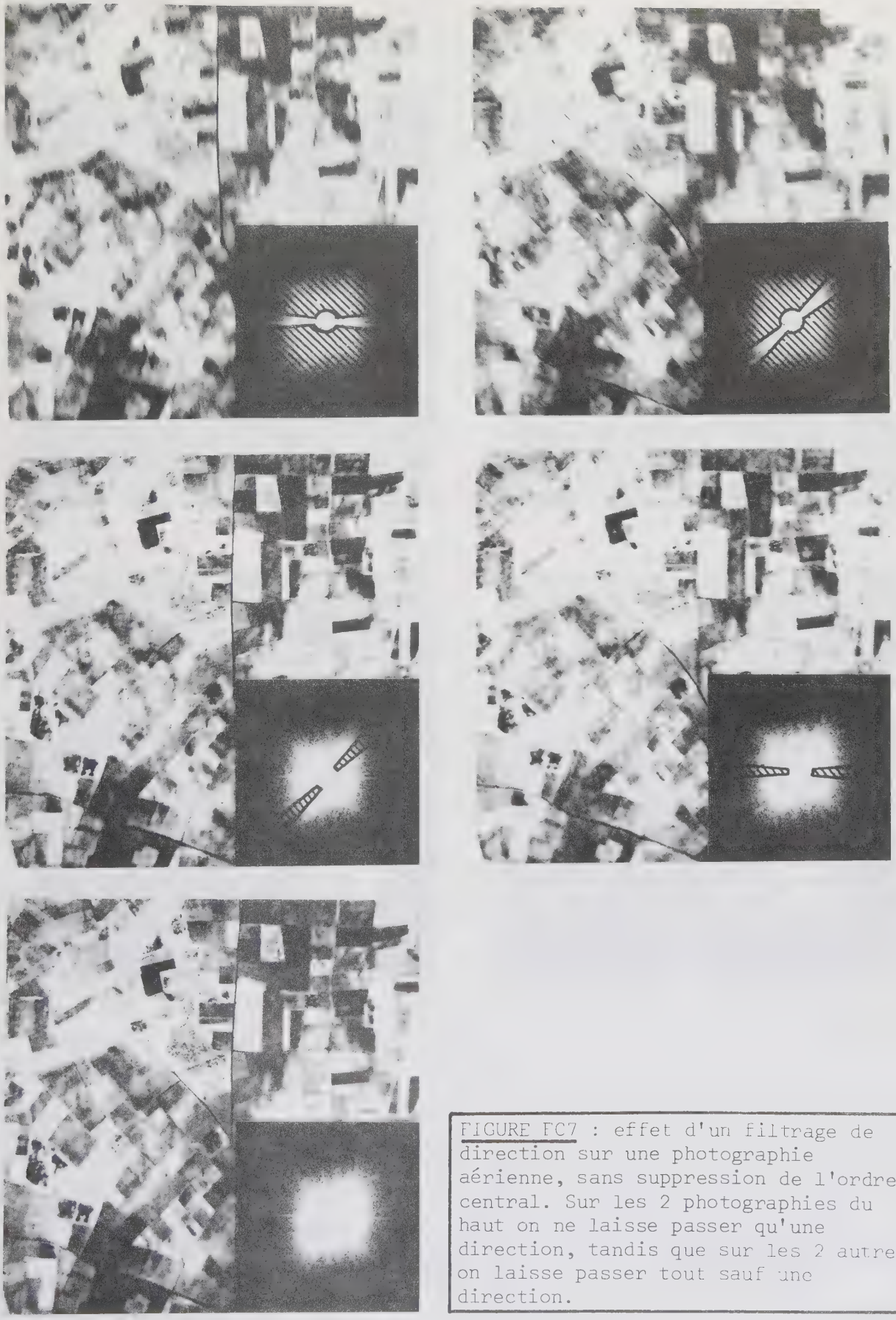


FIGURE FC7 : effet d'un filtrage de direction sur une photographie aérienne, sans suppression de l'ordre central. Sur les 2 photographies du haut on ne laisse passer qu'une direction, tandis que sur les 2 autres on laisse passer tout sauf une direction.

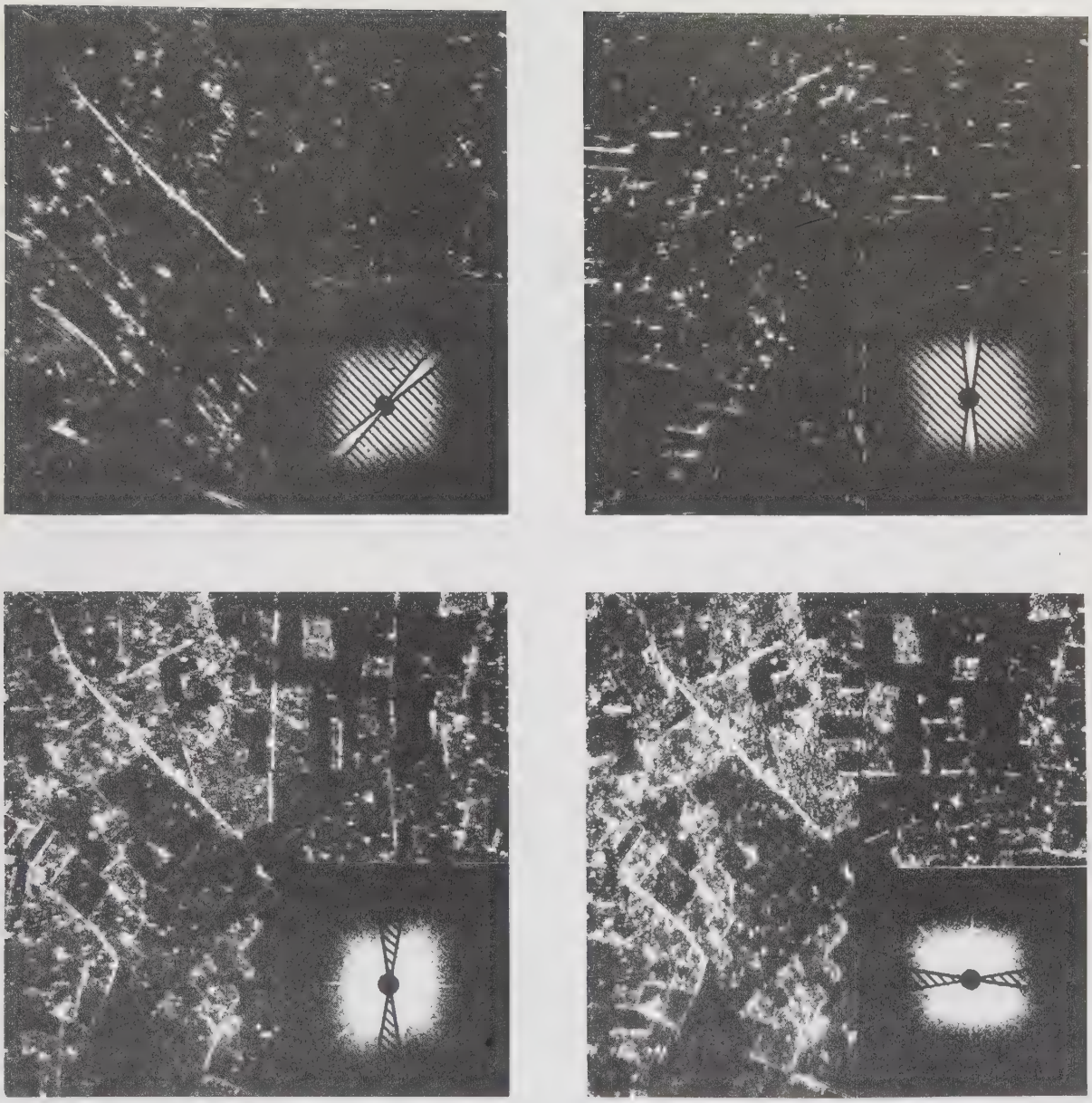
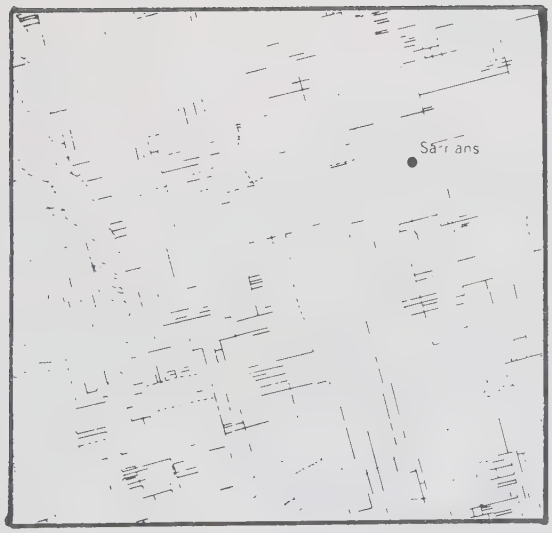


FIGURE FC8 : effet d'un filtrage de direction sur une photographie aérienne, avec suppression de l'ordre central. Les phénomènes unidirectionnels sont davantage mis en évidence que lorsqu'on ne supprime pas l'ordre central.

Photographie aérienne d'origine



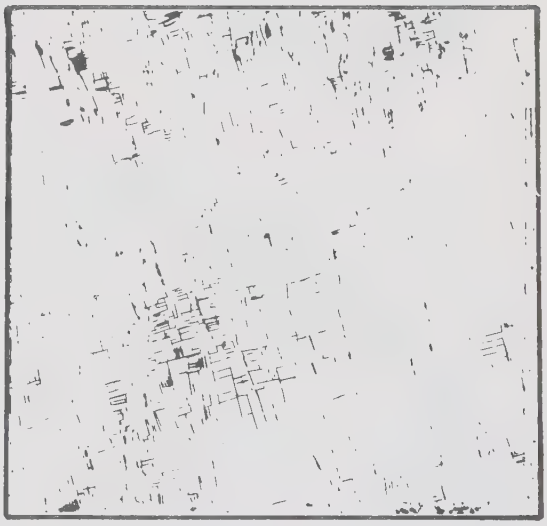


FIGURE FC9 : comparaison des deux méthodes utilisées pour relever les traces du cadastre romain dans la région d'Avignon. La photographie de gauche montre le résultat obtenu manuellement. Celle de droite montre le résultat d'un filtrage de direction en croix, avec suppression de l'ordre central.

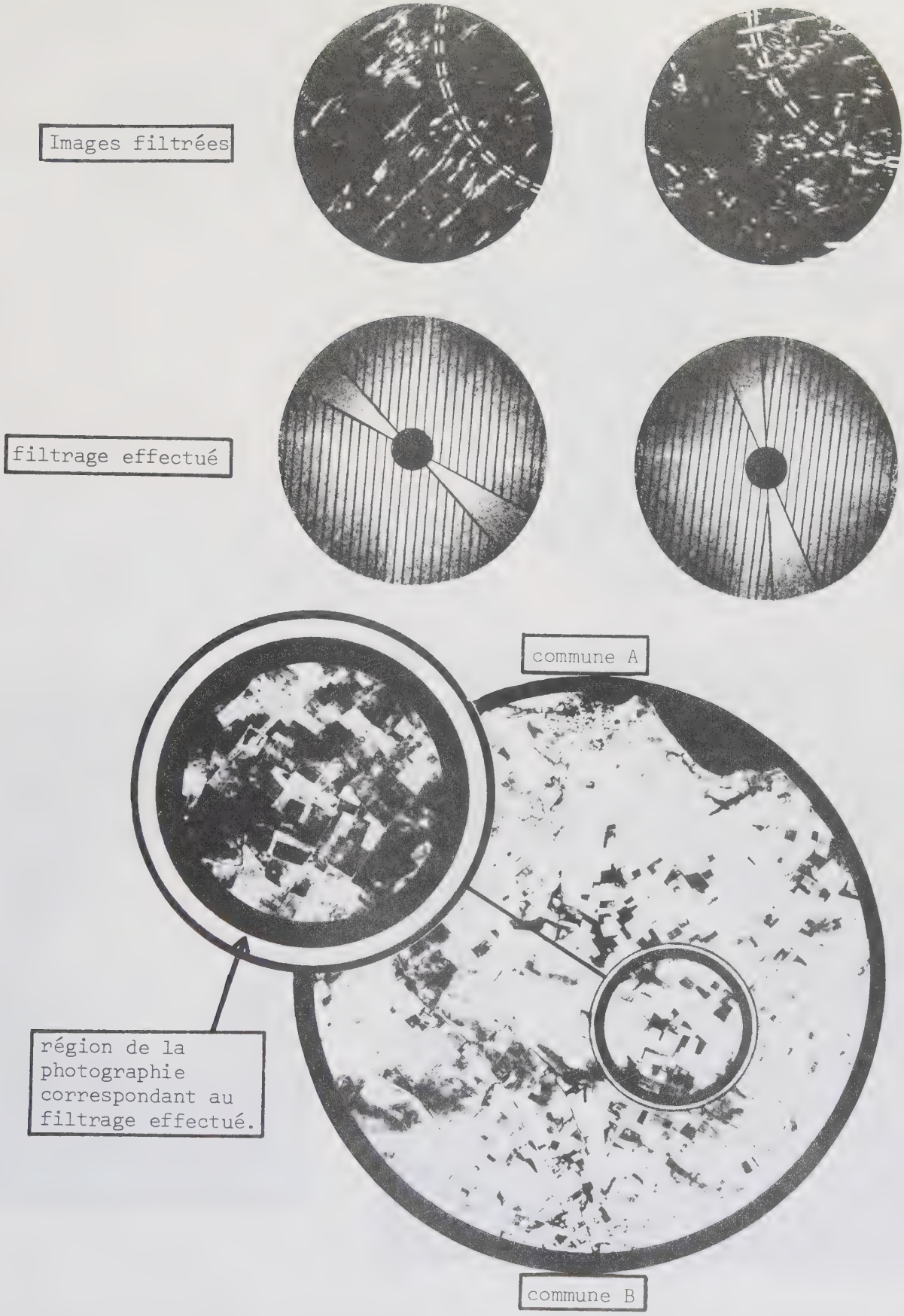
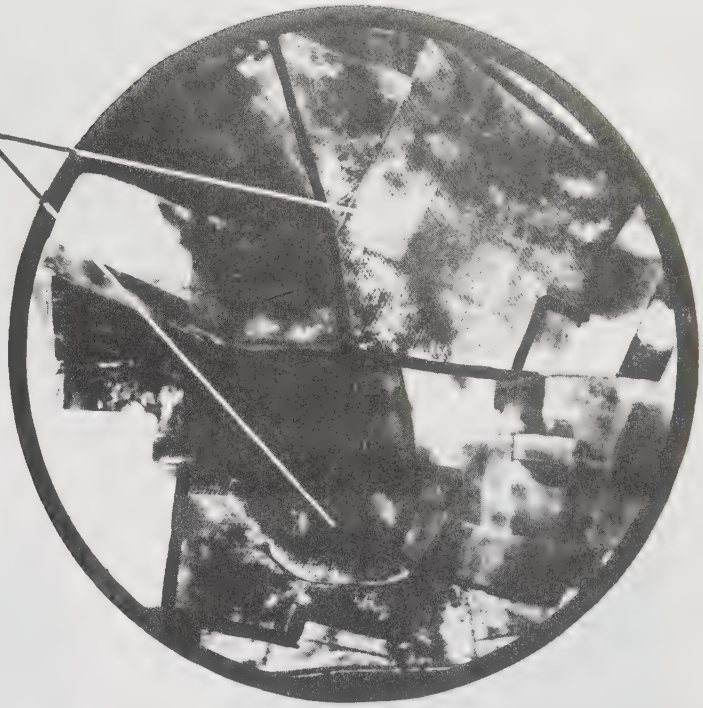


FIGURE FC10 : application du filtrage de direction à la mise en évidence de la séparation entre deux communes voisines, dans le cas d'une cadastration en étoile.

Structure périodique responsable des 4 points lumineux aux coins du spectre



Spectre de la photographie aérienne

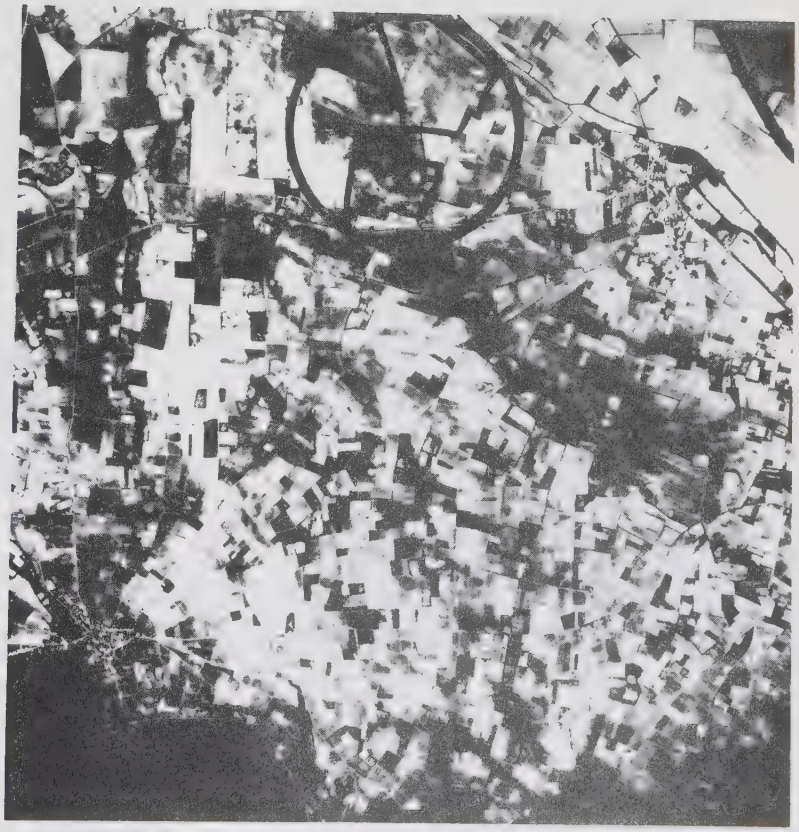


FIGURE FC11 : application du filtrage à la mise en évidence de structures périodiques sur une photographie aérienne.

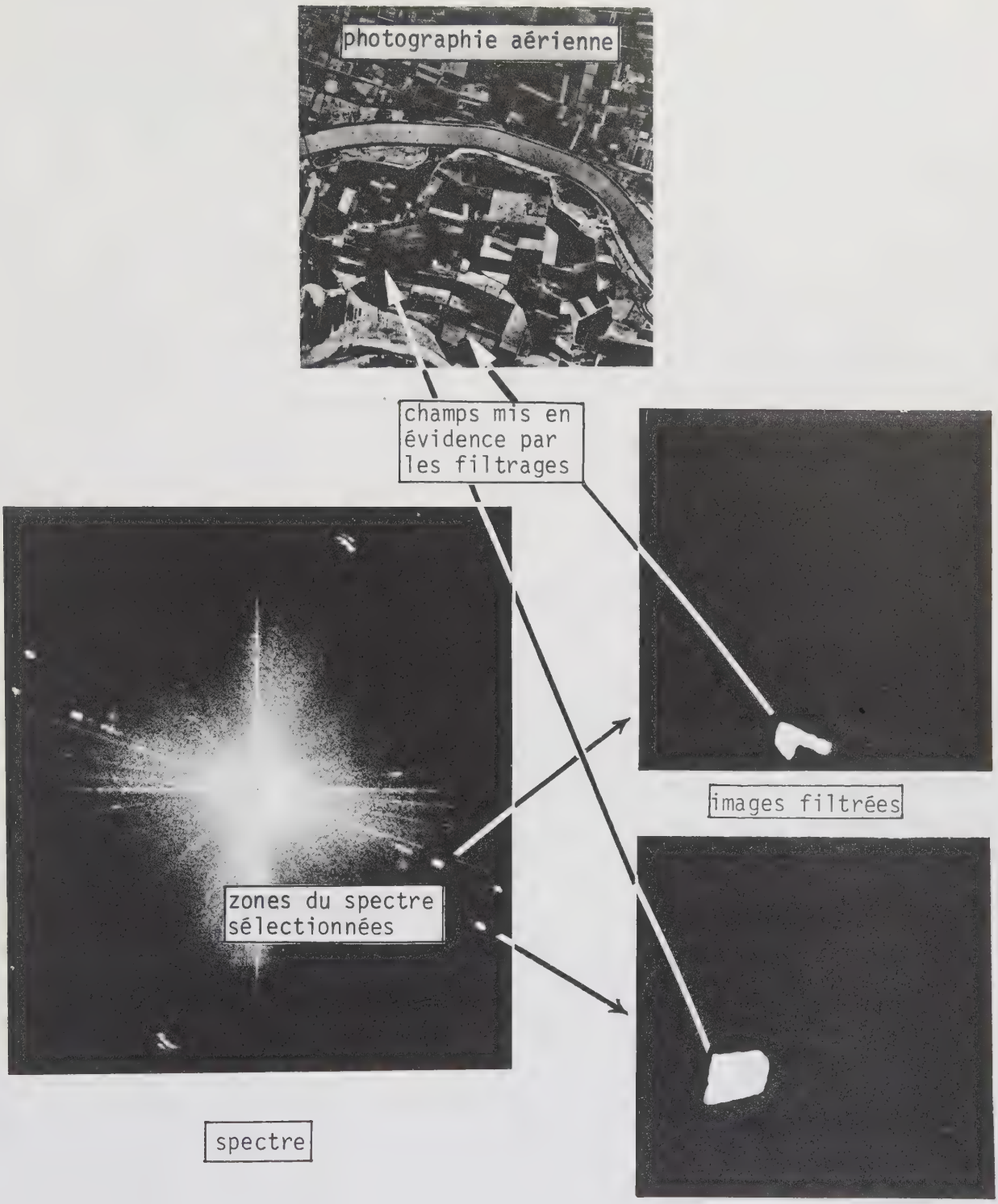


FIGURE FC11bis : application du filtrage à la localisation de différents types de culture à partir d'une photographie aérienne classique. Le critère de détection est la différence de périodicité de ces types de culture.

surfaces où sont cultivées différentes espèces. Le critère de sélection utilisé est la variation de la périodicité correspondant à chaque type de culture , et la technique utilisée n'est qu'un simple filtrage passe-bande. Si ce procédé n'est pas valable pour séparer les cultures de céréales, il est par contre parfaitement adapté à la détection des arbres fruitiers, des vignes ou des plantations d'arbres.

Les quelques applications énumérées précédemment prétendent démontrer l'intérêt de ce type de filtrage qui, bien qu'utilisant des filtres simples, permet d'apporter des résultats probants à de nombreux problèmes. Pour certains cas plus compliqués tels que la détection d'objets non périodiques, la soustraction de bruits parasites, il est nécessaire d'utiliser des filtres plus élaborés, tels que les filtres hologrammes dont quelques exemples d'utilisation sont présentés ci-après.

FC.V. APPLICATION DES FILTRES-HOLOGRAMMES A LA CORRELATION

Dans tous les exemples présentés jusqu'ici, le spectre n'est considéré que comme une représentation des fréquences spatiales de l'objet, les opérations de corrélation font appel aux propriétés mathématiques de la transformation de Fourier, en utilisant des filtres-hologrammes.

La réponse impulsionnelle de l'hologramme du spectre d'un objet est une figure complexe contenant une image de ce dernier. L'utilisation de cet hologramme comme filtre dans le plan du spectre d'un second objet, fait apparaître dans le plan image la fonction d'intercorrélation des deux objets. Cette fonction, couramment appelée produit de corrélation, peut être utilisée comme critère de ressemblance entre deux objets. Les conditions optimales d'enregistrement de l'hologramme, permettant d'obtenir un rapport Signal/Bruit maximal, ont été exposées par VAN DER LUGT (FC.8).

La figure FC.12 montre un exemple simple de détection utilisant cette méthode, qui peut être adaptée à un système de lecture automatique comme VAN DER LUGT l'avait suggéré (FC.9).
Pour nous familiariser avec ce type de détections, nous l'avons illustré

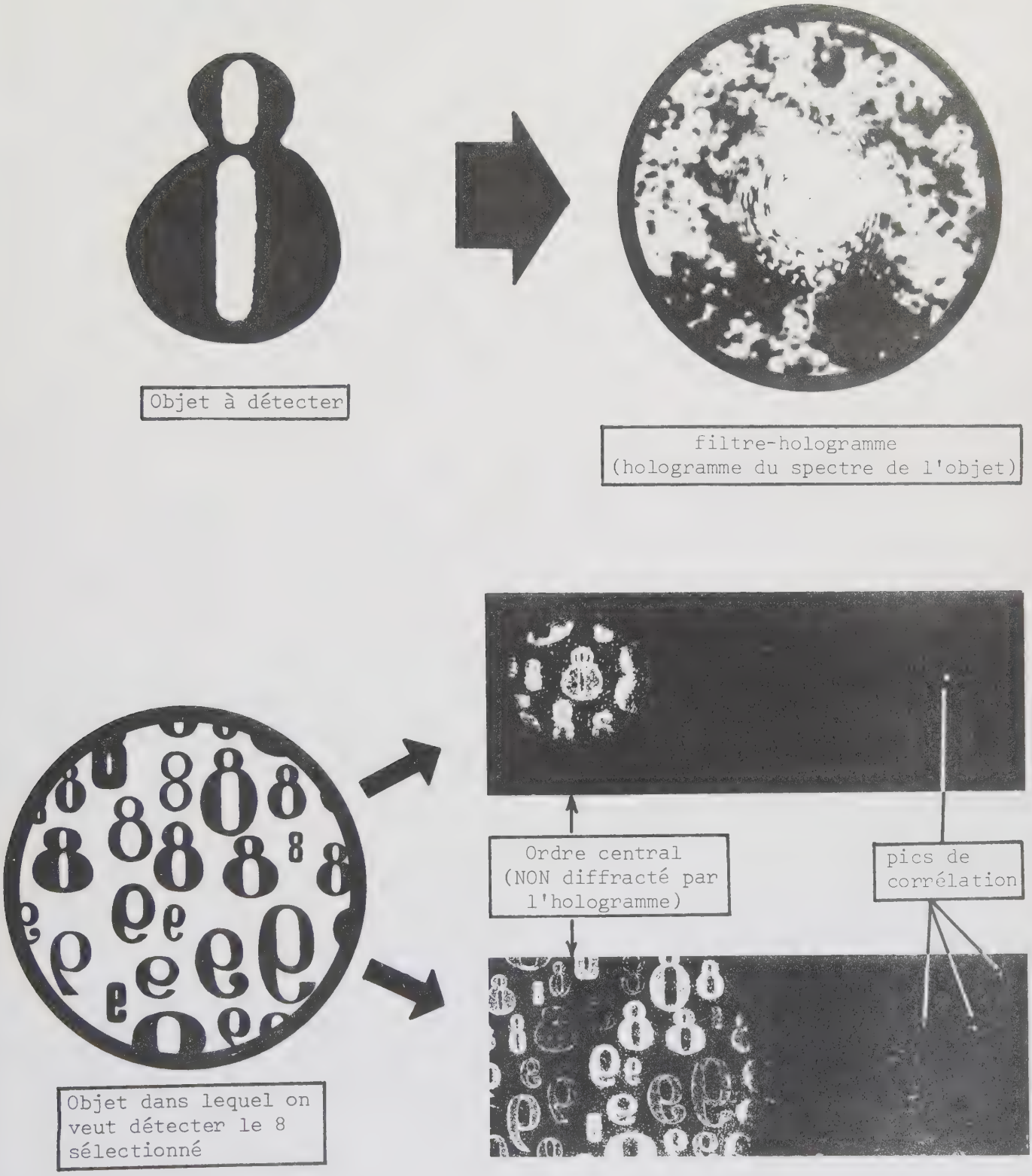


FIGURE FC12 : exemple de filtrage-corrélation. Détection d'un objet dans une collection.

par ce qui est schématisé figure FC.13. Une chaîne complète a d'ailleurs été mise au point au C.N.E.T. (FC.10). D'autre part, un dispositif de reconnaissance de forme tridimensionnelle a fait l'objet d'une étude approfondie au L.O.B.E. (FC.11).

Une autre importante application des propriétés de la fonction d'intercorrélation est la détermination de l'influence de différents paramètres sur l'évolution spatio-temporelle de phénomènes physiques. Par exemple, la fonction d'intercorrélation des signaux électriques délivrés par deux capteurs de température situés sur une canalisation, permet de mesurer "in situ" le débit du fluide. Ce genre de calcul est en général effectué sur des ordinateurs, qui doivent pour cela avoir d'énormes capacités de mémoires, rapidement prohibitives(x).

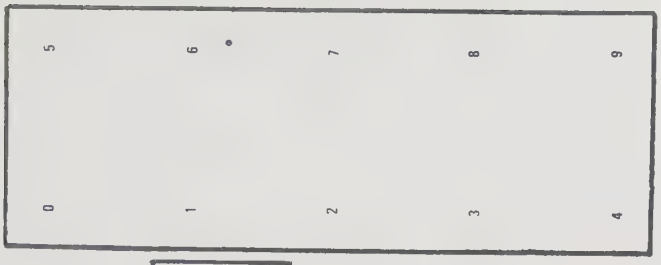
Le calcul des fonctions d'intercorrélation par les méthodes optiques semble donc être très appréciable, tant du point de vue de la souplesse d'utilisation que des moyens techniques à mettre en oeuvre.

Remarque : Dans le résultat de la multiplication du spectre par la transmittance d'un filtre-hologramme figure également le produit de convolution des deux fonctions objets, qui peut parfois présenter un intérêt dans la résolution de certains problèmes.

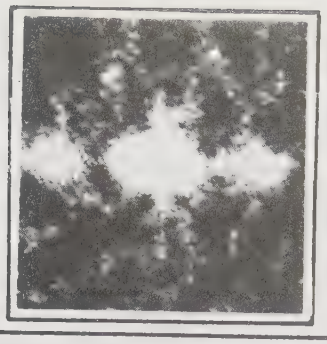
FC.VI. FILTRAGE MULTICANAL

Dans de nombreux problèmes de filtrage, il peut être intéressant de travailler sur plusieurs canaux simultanément. Il faut alors disposer d'un certain nombre de filtres et les faire intervenir sur le signal, ou différentes représentations de celui-ci, lors d'une opération unique.

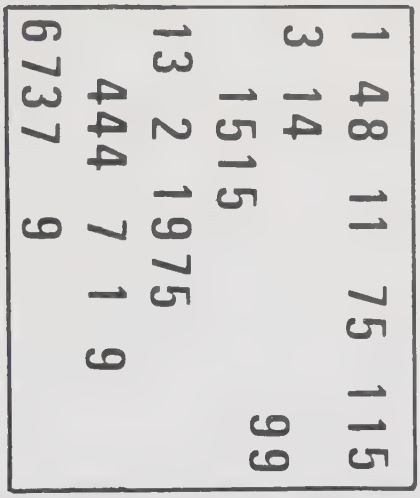
(x) Actuellement il faut encore plusieurs secondes aux calculateurs de F.F.T. (Fast Fourier Transform) les plus rapides pour calculer la T.F. d'une fonction définie par 1000 points.



Objet A



Filtre-hologramme de A



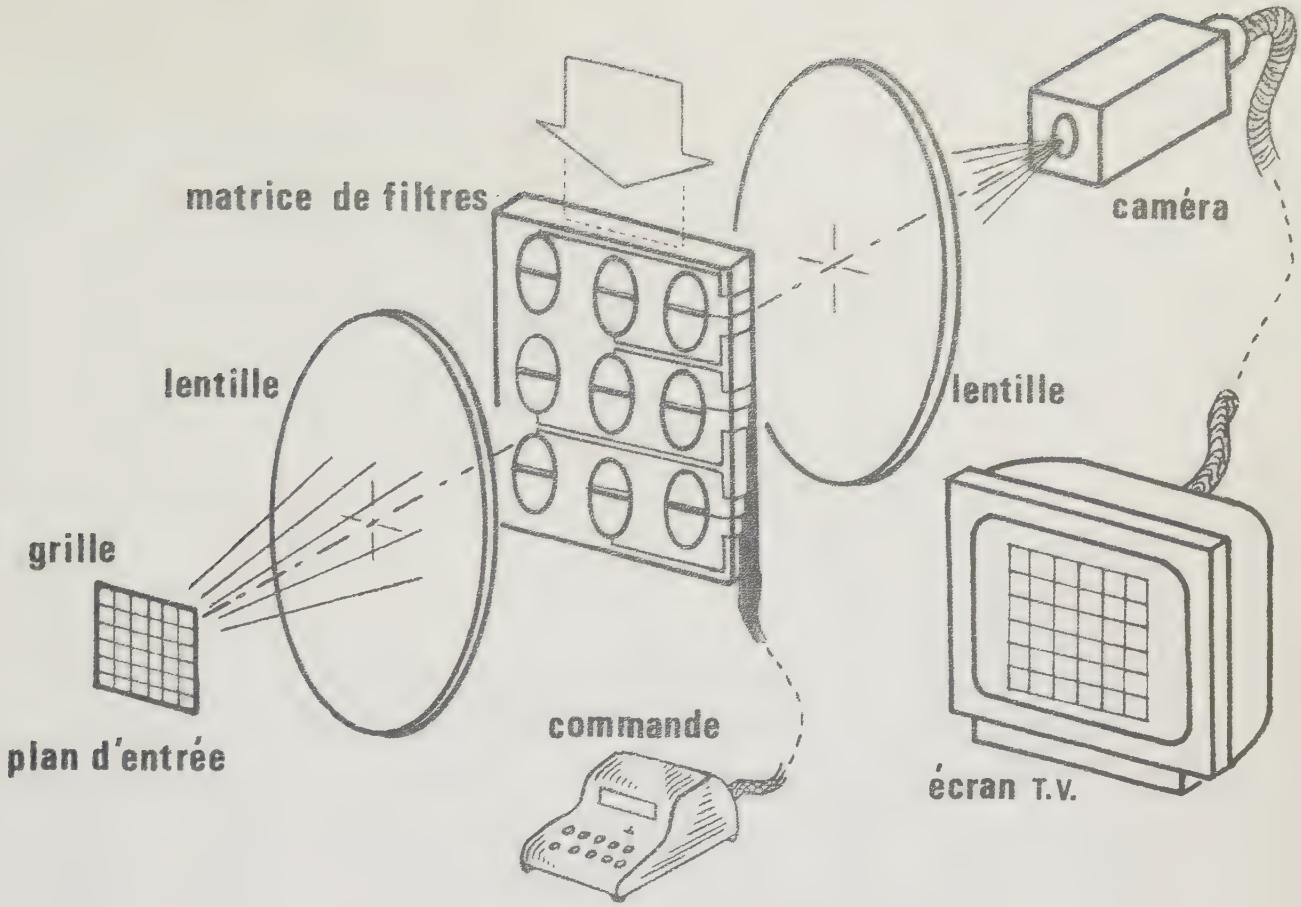
Objet B

Intercorrélation de A et B

FIGURE FC13 : exemple d'application de la corrélation à la lecture automatique. Chaque chiffre de l'objet B est détecté, dans le panneau du bas, dans la région correspondant à la région de l'objet A où ce chiffre a été mis en mémoire pour servir de référence (ainsi, les "4" seront détectés en bas à droite, les points brillants apparaissant là où se situe géographiquement les "4" dans l'objet B). Dans cet exemple, on détecte parfaitement les 7, 2, 4, 5, 9 et 8. Les 1 sont détectés, mais invisibles car l'énergie correspondante est plus faible que pour les autres chiffres. Les 3 et 6 ne sont pas détectés.

Plusieurs procédés ont été proposés, tels celui de G. G.WINZER (FC.12), qui consiste en un multiplexage séquentiel des canaux, le spectre de l'objet se formant successivement au centre de chacun des filtres d'une collection. M.KOCK et G.RABE (FC.13) ont utilisé le multiplexage séquentiel et le multiplexage parallèle. Un moyen rationnel permettant de disposer de N spectres d'un objet simultanément est l'utilisation de grilles multiplicatrices. J.L. TRIBILLON a étudié leur mise en oeuvre au L.O.B.E. (FC.14), et a suggéré le principe d'un dispositif multicanal de filtrage, schématisé sur la figure FC.14.

L'étude et la réalisation d'un tel appareil sont présentées au chapitre suivant.



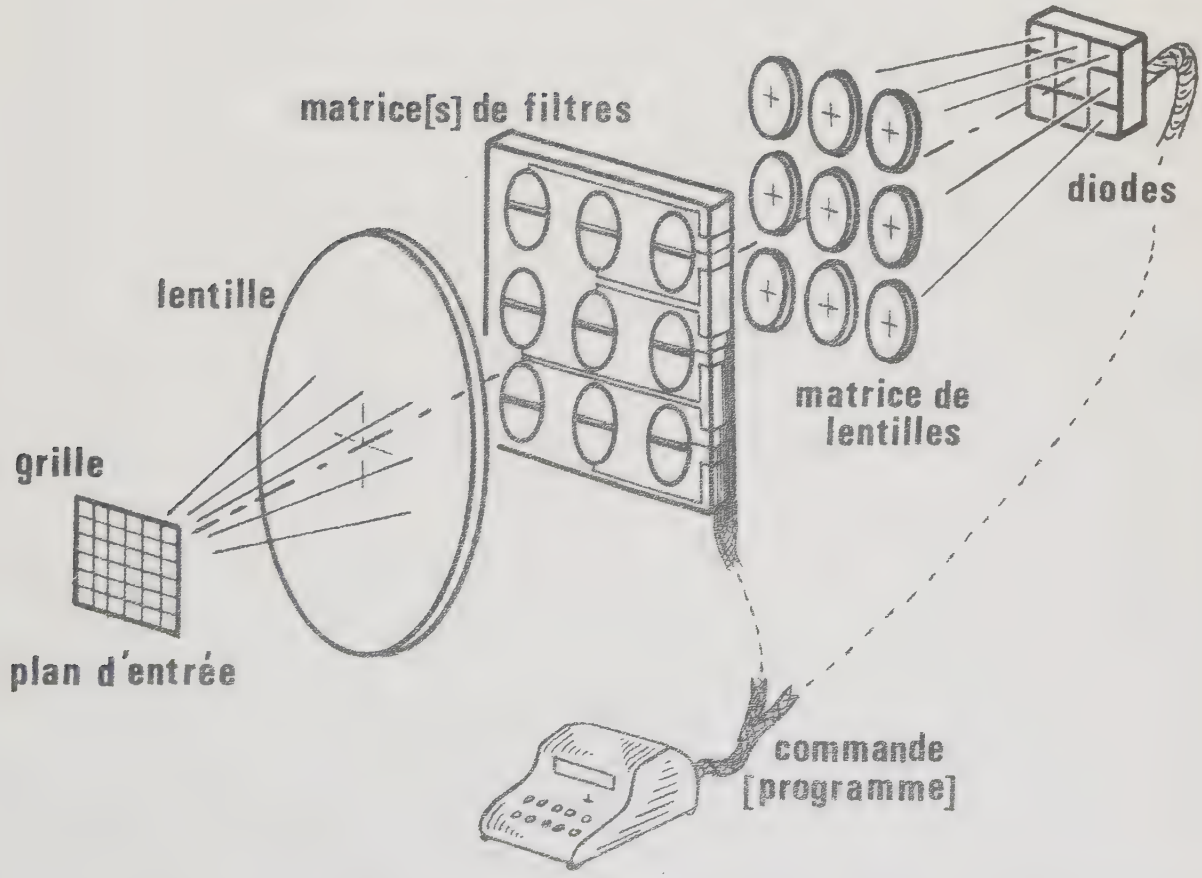


FIGURE FC 14 : Schéma du principe d'un dispositif de filtrage multicanal automatisé, montrant deux modes possibles d'utilisation

C H A P I T R E A. M.

ETUDE ET REALISATION D'UN APPAREIL MULTICANAL DE FILTRAGE

AM.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre FC, nous avons donné quelques exemples de filtrage des fréquences spatiales et de filtrage-corrélation. Afin de pouvoir réaliser sur plusieurs canaux ces opérations, on souhaite disposer d'un appareil automatique permettant en outre la sélection des filtres parmi une collection. Ce chapitre traite donc de la conception et de la réalisation d'un tel appareil. Après avoir présenté les impératifs de réalisation, une longue partie est consacrée à l'étude des circuits logiques. Nous avons un peu insisté sur ce point afin que les néophytes puissent suivre le déroulement de la résolution d'un problème de logique. La partie de logique séquentielle, consacrée à l'étude du sélecteur de filtres, n'a pas été traitée par une méthode systématique car dans le cas de problèmes de ce type, la méthode de résolution que nous avons utilisée conduit en général plus rapidement à une solution satisfaisante. La suite du chapitre traite de la réalisation de l'appareil, puis de la réalisation des filtres. Une présentation générale de l'appareil ainsi qu'une notice d'utilisation terminent ce chapitre.

AM.II. POSITION DU PROBLEME - CHOIX DU DISPOSITIF

AM.II.1. Performances souhaitées

L'appareil qu'on se propose de réaliser est destiné à être intégré dans un montage optique de filtrage. Il permettra d'effectuer simultanément, sur un nombre N de canaux, différentes opérations de filtrage ou de corrélation.

Chaque canal doit pouvoir être ouvert ou fermé indépendamment des autres. Il faut que l'opérateur puisse commander ces opérations tout en observant le plan de sortie du montage optique. D'autre part, afin d'effectuer plusieurs traitements simultanément sur un même objet, toutes les combinaisons des canaux doivent être réalisables. Afin de ne pas trop compliquer un premier appareil, nous avons considéré que 9 canaux suffisaient. Ce nombre correspond au fait que la méthode d'obtention des N spectres de l'objet que nous avons choisi consiste à utiliser des grilles multiplicatrices. Etant donnés les travaux déjà faits au Laboratoire dans ce domaine (AM.1) nous étions assurés de pouvoir disposer de grilles multiplicatrices par 9. D'autre part, si dans le cas de filtrage-corrélation un nombre très grand de canaux est très intéressant, il n'en est pas de même dans le cas du filtrage des fréquences spatiales où les 512 combinaisons possibles avec 9 canaux sont amplement suffisantes.

Une autre fonction que l'appareil doit accomplir est le changement automatique des filtres. L'opérateur commande à distance la mise en place des filtres choisis parmi une collection. Le nombre de filtres dont on souhaite pouvoir disposer est de cent environ. Le temps nécessaire aux opérations de changement de filtre doit évidemment être le plus petit possible.

Quant à la précision de centrage des filtres, il est souhaitable qu'elle soit du même ordre de grandeur que celle qu'on atteint manuellement. Généralement, une précision de l'ordre du centième du diamètre utile du spectre est suffisante. C'est cet ordre de grandeur que nous adopterons.

AM.II.2. Impératifs technologiques

AM.II.2.a. Encombrement et poids

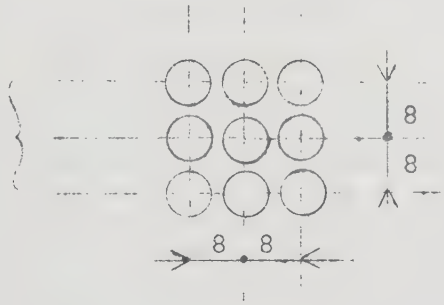
Une partie de l'appareil devra être montée sur un banc optique avec précision. Cela fixe les limites volumiques et massiques à ne pas dépasser. En effet, le calage initial de l'ensemble nécessite l'utilisation d'une platine micrométrique à 3 degrés de translation. Aussi la partie mobile du dispositif ne devra pas excéder 5 kg. Quant à la partie chargée de la commande, nous

souhaitons simplement qu'elle soit portable.

AM.II.2.b. *Dimension et espacement des canaux*

Sur un banc optique de 3 m, un montage de corrélateur du type 6f ne peut utiliser des objectifs dont la longueur focale est supérieure à 50 cm. Dans ce type de montage, les objectifs ont rarement une ouverture de plus de f/5. Pour une longueur focale de 50 cm, cela correspond à un diamètre maximal de 10 cm. Aussi les dimensions et la disposition des canaux ont-elles été fixées comme suit

9 trous Ø : 6



AM.II.2.c. *Précision du positionnement*

On a vu précédemment qu'une précision de centrage des filtres égale au centième du diamètre du canal était suffisante. Dans le cas présent, cela correspond à 0,06 mm. Le dispositif chargé de la mise en place des filtres doit donc être conçu de façon que cette précision soit atteinte sans qu'il soit nécessaire d'effectuer un recalage manuellement.

AM.II.3. Schéma général de l'appareil

L'appareil se compose de deux parties : une unité active placée sur le banc optique, et une unité de commande, constituée de tous les éléments nécessaires au pilotage de la première.

AM.II.3.a. *L'unité active*

Elle comprend :

- une réserve de filtres
- un dispositif de mise en place des filtres
- 9 obturateurs correspondant aux 9 canaux
- des capteurs, dont le rôle est de communiquer à l'unité de commande les données relatives à l'état de l'unité active.

AM.II.3.b. *L'unité de commande*

Elle comprend :

- les unités logiques de commande du sélecteur de filtre et du sélecteur de canaux,
- les organes de communication avec l'opérateur (claviers, commutateurs, témoins lumineux),
- les alimentations destinées à fournir la puissance électrique nécessaire à l'ensemble.

La figure AM.1 représente le schéma général de l'appareil. On y retrouve la configuration caractéristique des systèmes automatiques :

- *la machine* ou unité active,
- *les capteurs* (ou palpeurs) qui traduisent les grandeurs caractéristiques de la machine en *variables d'entrée*,
- *les actionneurs* qui, commandés par *les variables de sortie*, modifient l'état de la machine,
- *l'unité logique* qui calcule les variables de sortie en fonction des variables d'entrée et de leur évolution temporelle.

Les organes de communication avec l'opérateur sont considérés comme des capteurs et des actionneurs. Les *interfaces* sont des éléments destinés à assurer la comptabilité des différentes parties.

Sur le schéma, le sélecteur de canaux et le sélecteur de filtres font partie d'un même ensemble. Cependant les deux fonctions étant totalement indépendantes, leur étude sera faite séparément.

AM.III ETUDE DU SELECTEUR DE CANAUX

AM.III.1. Préliminaires

Le dispositif de sélection des canaux est constitué de 9 obturateurs disposés suivant une matrice 3 x 3. Il faut en effet pouvoir réaliser toutes les combinaisons possibles des canaux à partir de systèmes simples. Etant données les dimensions fixées par les impératifs optiques, on ne saurait utiliser 9 obturateurs indépendants. Nous avons étudié différentes possibilités, telles qu'un obturateur à volets et un obturateur à cristal liquide(x), et nous avons finalement choisi une solution utilisant des barrettes coulissantes.

La figure AM.2 montre quelques exemples de solutions, qui ont toutes l'inconvénient de ne pas permettre une commande indépendante de chaque canal. Parmi ces solutions, la dernière est la plus simple, puisqu'elle utilise 3 variables totalement indépendantes et dont le nombre minimal d'états est 8.

(x) Ce projet est présenté en annexe à la fin du mémoire.

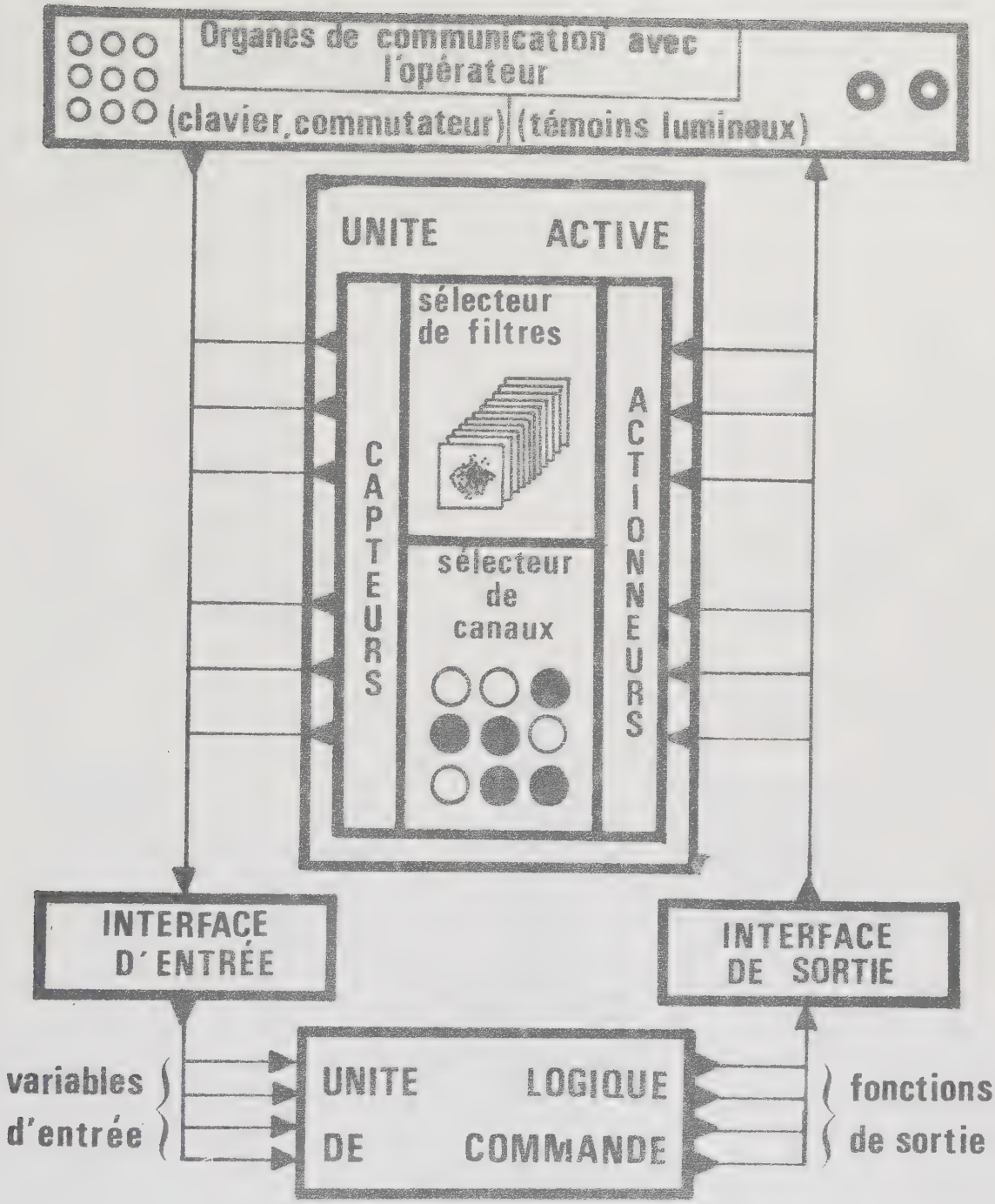
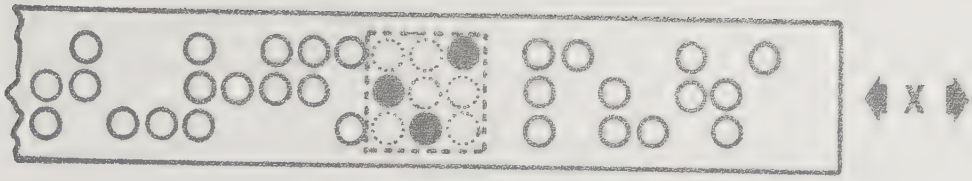
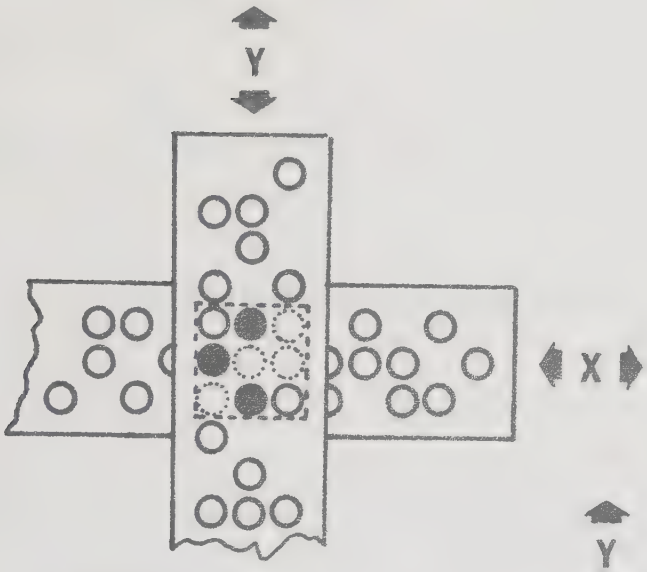


FIGURE AM 1 : Schéma général de l'appareil.

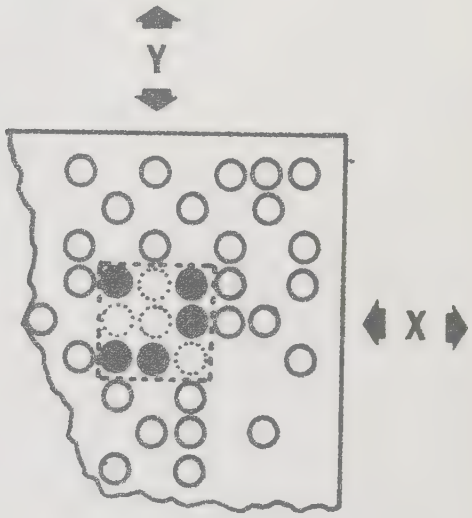


solution A : 1 variable á 512 états (minimum)



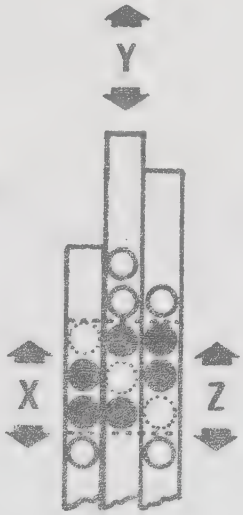
solution B :

2 variables à 23 états (minimum)



solution C :

2 variables à 23 états (minimum)



solution D :

3 variables à 8 états (minimum)

FIGURE AM 2 : Diverses possibilités de sélecteur de canaux mécaniques.

C'est donc cette solution qui a été retenue et dont nous allons aborder l'étude.

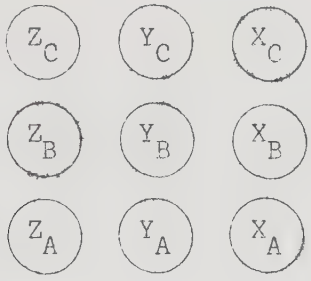
AM.III.2. Etude de l'obturateur

La solution adoptée consiste donc à translater trois barrettes identiques, chacune ayant pour rôle d'ouvrir et fermer trois canaux. Ces barrettes sont indépendantes et doivent permettre d'obtenir chacune des huit combinaisons possibles des 3 canaux correspondants. La disposition des trous dans la barrette qui a été adoptée est la seule qui permette d'obtenir les 8 états en 8 positions adjacentes, comme on peut le voir sur la figure AM.3

Appelons X, Y et Z les 3 barrettes, X_A, X_B et X_C les variables logiques qualifiant l'état des 3 canaux de la barrette X.

X_B = 0 signifie que le canal X_B est fermé,
Y_C = 1 signifie que le canal X_C est ouvert.

La disposition des canaux dans l'appareil est représentée ci-dessous.



La figure AM.4 montre la *table de vérité* de X_A, X_B et X_C. Cette table exprime les niveaux logiques pris par les variables Xi pour chacun des états de translation de la barrette X.

Chaque barrette est déplacée à l'aide d'un moteur électrique à double sens, par l'intermédiaire d'une vis sans fin. Les ordres déterminant le sens de rotation et la mise en route des moteurs sont calculés par l'unité logique en fonction de ce que l'opérateur affiche sur un clavier et de l'état des canaux. Il importe donc de connaître ces états. La solution la plus immédiate consiste à utiliser trois capteurs (photoélectriques par exemple) pour chaque barrette. Dans le cas de capteurs photoélectriques, ils seront éclairés ou non selon que les canaux correspondants sont ouverts ou fermés. Cependant, lors de la translation des barrettes, des états logiques parasites apparaissent sur les capteurs. C'est pourqoi il est nécessaire de prévoir un 4ème capteur chargé de délivrer une courte impulsion chaque fois que la position de la barrette correspond à un des 8 états. Si cette impulsion est utilisée pour mettre dans une mémoire tampon ("Latch") les niveaux logiques des capteurs à cet instant

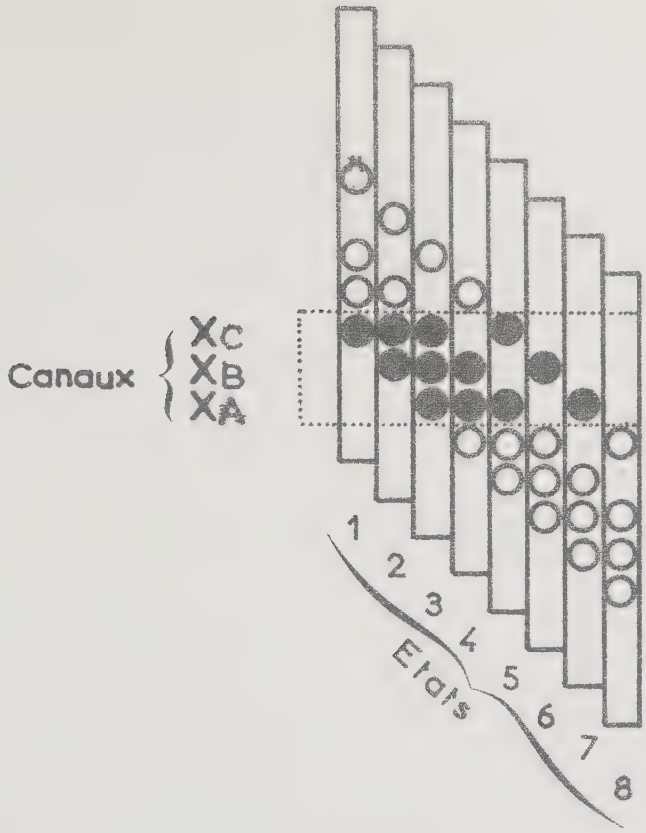


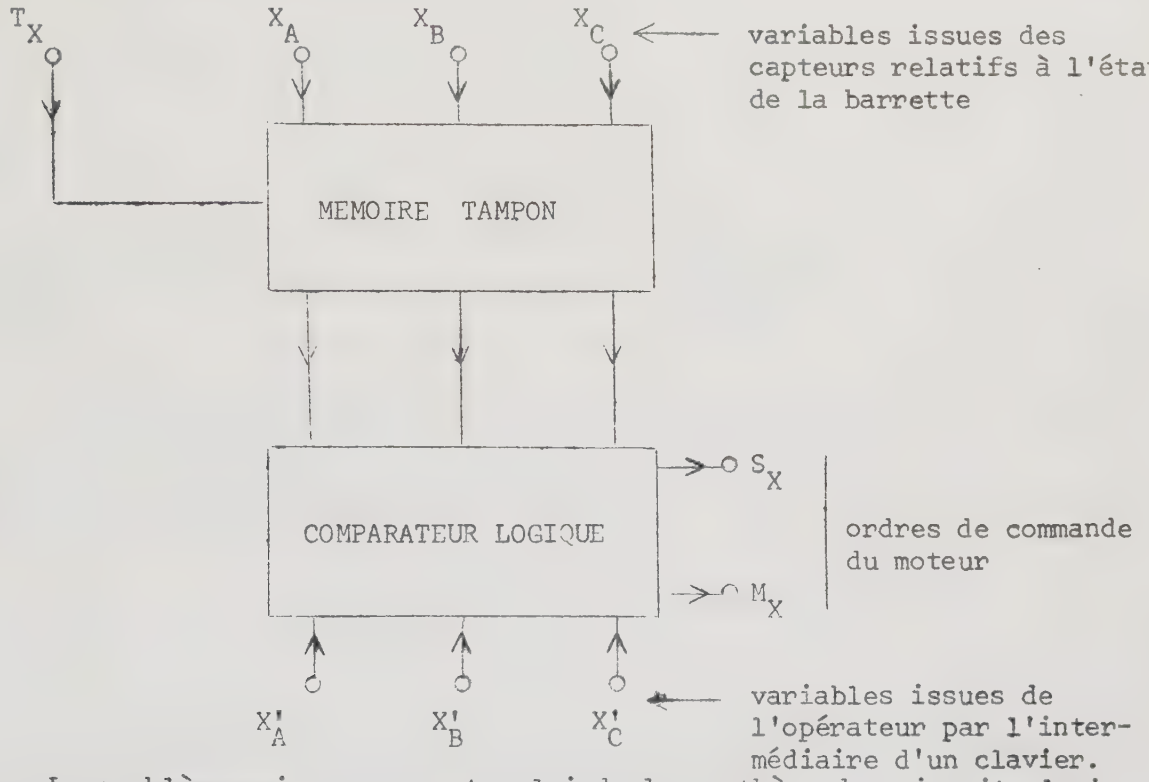
FIGURE AM 3 : Les 8 états d'ouverture des canaux en fonction de la position de la barrette.

Etats	1	2	3	4	5	6	7	8
X_A	0	0	1	1	1	0	1	0
X_B	0	1	1	1	0	1	0	0
X_C	1	1	1	0	1	0	0	0

FIGURE AM 4 : Table de vérité correspondante.

tous les états pris par ces derniers lors de la translation ne seront pas pris en compte.

L'unité logique chargée de calculer les ordres à donner aux moteurs est représentée sur la figure suivante. X'_A, X'_B et X'_C représentent les niveaux logiques que l'opérateur veut affecter aux canaux $X_A X'_B$ et X_C. Un système analogue calcule les ordres S_Y, M_Y, S_Z et M_Z.



Le problème qui se pose est celui de la synthèse des circuits logiques de calcul de S_x et M_x en fonction de T_x, X_A, X_B, X_C, X'_A, X'_B et X'_C. C'est un problème de logique combinatoire que nous avons résolu par la méthode de Karnaugh (AM.3).

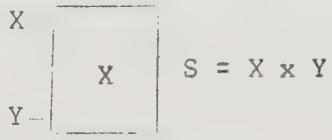
La figure AM.5 rappelle les principales fonctions logiques, leur représentation schématique et leur écriture symbolique, en donnant un exemple de lecture d'une expression logique.

On sait que toute fonction logique est réalisable à partir de deux quelconques des 16 fonctions logiques de base. Les circuits intégrés les plus courants à l'heure actuelle sont réalisés en technologie TTL(x), or la fonction logique la plus souple d'utilisation dans cette technologie est la fonction

(x) TTL : Transistor Transistor Logic : c'est une technologie de fabrication des circuits logiques. Il en existe plusieurs qui ont chacune des caractéristiques différentes. Les circuits les plus facilement réalisables en TTL ne sont pas les mêmes qu'en DTL (Diode Transistor Logic). La sensibilité aux parasites, la consommation électrique dépendent également de ces familles.

FONCTION	Représentation schématique	Symbole
PAS, NON, COMPLEMENT, barre (NOT)	X $S = \overline{X}$	$\overline{X}$
OU (OR)	X, Y $S = X + Y$	$X + Y$
ET (AND)	X, Y $S = X.Y$	$X.Y$
NI (NOR)	X, Y $S = \overline{X + Y}$	$X \downarrow Y$
ON, NET (NAND)	X, Y $S = \overline{X.Y}$	X/Y
DILEMME, OU EXCLUSIF	$S = \overline{X}\,Y + X\,\overline{Y}$	$X \oplus Y$
IMPLICATION	$S = \overline{X} + B$	$X \leq Y$

Chacune des 16 fonctions booléennes a un symbole. Dans le cas où il n'existe pas de représentation schématique de la fonction, si X est son symbole, elle sera représentée comme ci-dessous :



Dans la suite de l'étude nous n'utilisons que les 3 symboles (-, + et .) qui permettent de décrire toutes les autres fonctions. Ainsi X/B = X.Y se lira X NAND B égale (X et Y) barre. La loi de De Morgan ($\overline{X.Y} = \overline{X} + \overline{Y}$) s'énonce |(X et Y) barre| égale (X barre ou Y barre). De même $\overline{X}\,\overline{Y}$ doit se dire par exemple (X barre, Y barre)barre.

Figure AM.5 - Les fonctions logiques, leurs représentation, et la façon d'énoncer des expressions logiques

(ou porte) NAND. C'est donc à base de portes NAND que nous allons réaliser les fonctions S_x et M_x (une porte NOT étant un cas particulier de porte NAND).

AM.III.2.a. Synthèse logique de M_x

La table de vérité de M_x est visible sur la figure AM.6. Elle montre les états logiques de M_x pour tous les états logiques possibles de X_A, X_B, X_C, X'_A, X'_B et X'_C. Elle montre en outre que $M_x = 0$ lorsqu'il y a égalisation des termes correspondants, d'où l'expression logique de M_x

$$M_x = \overline{(X_A X'_A + \overline{X}_A \overline{X}'_A)(X'_B X'_B + \overline{X}_B \overline{X}'_B)(X_C X'_C + \overline{X}_C \overline{X}'_C)}$$

En tenant compte de la relation suivante :

$$XX' + \overline{XX'} = \overline{\overline{XX'}.\overline{\overline{XX'}}}$$

l'expression de M_x devient

$$M_x = \overline{\overline{X_A X'_A \overline{X}_A \overline{X}'_A X_B X'_B \overline{X}_B \overline{X}'_B X_C X'_C \overline{X}_C \overline{X}'_C}}$$

La figure AM.6 représente le schéma du circuit de synthèse de M_x. Des circuits analogues synthétisent M_y et M_z.

AM.III.2.b. Synthèse de S_x

La table de vérité de S_x est visible sur la figure AM.7. Les cases marquées ϕ correspondent à des états sans importance (Φ-Booléens), qui peuvent prendre la valeur 0 ou 1 sans changer le fonctionnement de l'ensemble. Cela s'explique dans ce cas par le fait que lorsqu'un moteur est arrêté, l'ordre qui définit son sens de rotation est sans importance.

Chaque case de la table de vérité représente un vecteur de la base canonique. La méthode de Karnaugh consiste à construire un tableau où les vecteurs adjacents ne diffèrent que par une variable. Cette transformation de la table de vérité en tableau de Karnaugh est représentée sur la figure AM.8.Ce tableau montre que la fonction S_x contient 28 éléments de la base canonique. Cependant, on peut minimiser ce nombre en opérant des groupements adjacents de ces éléments. On peut pour cela affecter aux cases ϕ la valeur 0 ou 1 selon qu'elles permettent ou non un groupement intéressant. On voit sur la figure

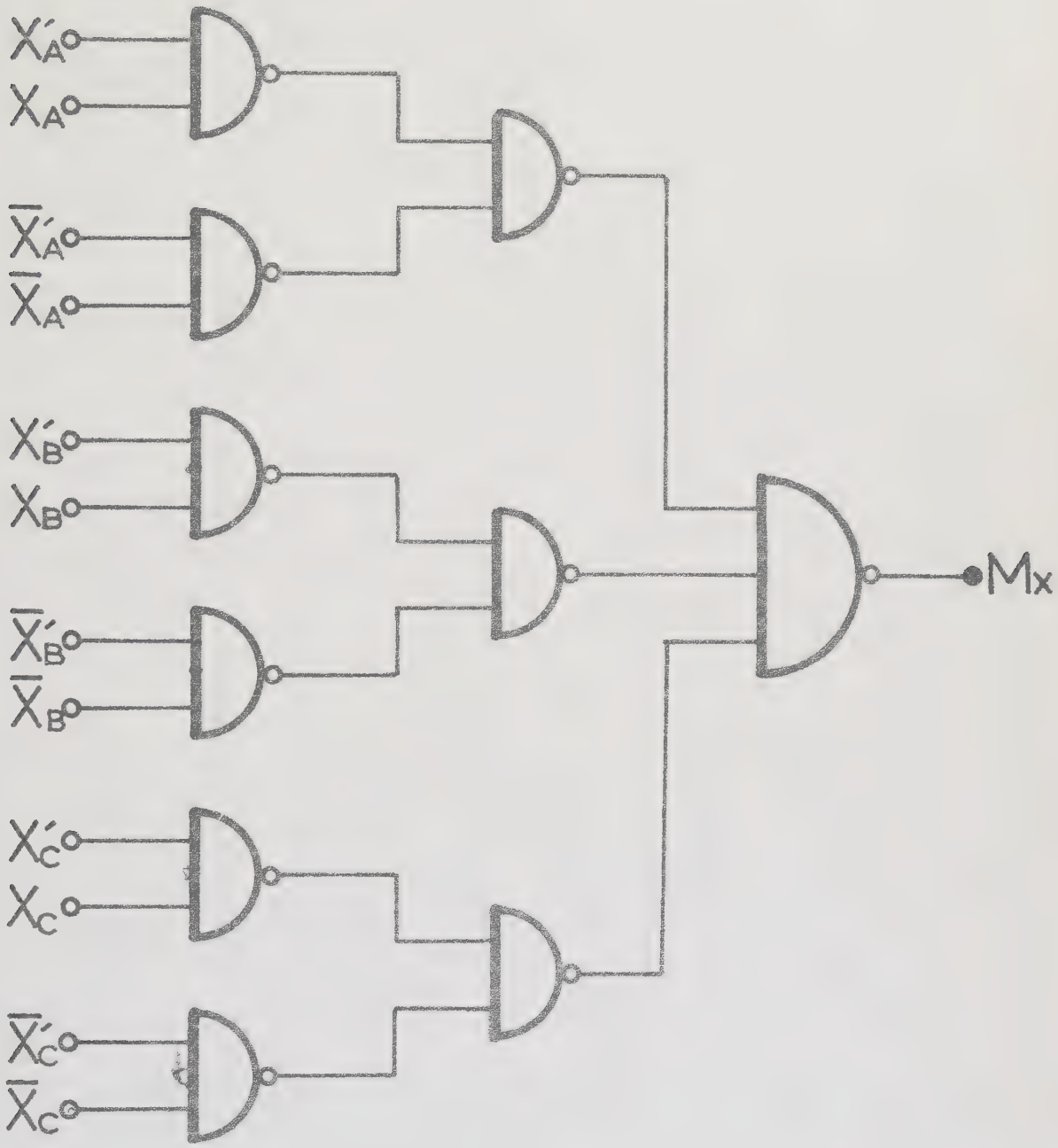


FIGURE AM 6 : Schéma du circuit logique de synthèse de la variable M_x. Les circuits réalisant les variables M_y et M_z sont identiques.

X_A	X_B	X_C	X'_A	X'_B	X'_C	M_X	S_X
0011101000111010001110100011101000111010001110100011101	0111010001110100011101000111010001110100011101000111010	1110100011101000111010001110100011101000111010001110100	0000000000000000111111111111111111111111000000000111111	0000000011111111111111111111111100000000000000000000000	1111111111111111111111111111111100000000000000000000000	0111111111011111111101111111101111111101111111110111111110	ϕ111111110ϕ111111100ϕ111110000ϕ111100000ϕ110000000ϕ100000000ϕ

FIGURE AM.7 - Tableau de vérité des variables M_X et S_X. Il exprime les valeurs des variables de sortie en fonction des valeurs des variables d'entrée.

X_A	X_B	X_C \ X'_A	0	0	1	1	1	0	1	0
		X'_B	0	1	1	1	0	1	0	0
		X'_C	1	1	1	0	1	0	0	0
0	0	1	Ø	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	Ø	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	Ø	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	Ø	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	Ø	0	0	0
0	1	0	1	1	1	1	1	Ø	0	0
1	0	0	1	1	1	1	1	1	Ø	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	Ø

X_A	X_B	X_C \ X'_A	0	0	0	0	1	1	1	1
		X'_B	0	0	1	1	1	1	0	0
		X'_C	0	1	1	0	0	1	1	0
0	0	0	Ø	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	Ø	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	Ø	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	Ø	1	1	1	0
1	1	0	0	1	1	0	Ø	1	0	0
1	1	1	0	1	1	0	0	Ø	0	0
1	0	1	0	1	1	0	1	1	Ø	0
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	Ø

FIGURE AM 8 : Construction du tableau de Karnaugh de la fonction logique S_x. Le fonctionnement désiré de l'obturateur permet d'aboutir immédiatement à la repprésentation matricielle de la table de vérité (en haut). Il suffit alors d'ordonner différemment les lignes et les colonnes pour réaliser le tableau de Karnaugh (en bas).

AM.9 quatre possibilités de groupement et les expressions de S_x qui correspondent. La solution la plus intéressante est celle qui a le plus petit nombre de termes, donc la première.

L'expression de S_x est donc la suivante :

$$S_x = \overline{X}'_A\overline{X}'_B X'_C + X_A\overline{X}'_A X_C + \overline{X}_B\overline{X}_C X'_B + \overline{X}_B\overline{X}_C X'_A$$

$$+ X_A\overline{X}_B X'_A X'_B + X_B\overline{X}_C X'_A X'_B + \overline{X}_A X_B\overline{X}_C X'_C$$

En utilisant la loi de De Morgan ($\overline{AB+CD} = \overline{AB}.\overline{CD}$) on aboutit au schéma logique de la figure AM.10. Des circuits identiques seront utilisés pour réaliser les fonctions S_y et S_z correspondant au sens des moteurs des barrettes Y et Z.

AM.IV. LE SELECTEUR DE FILTRES

AM.IV.1. Préliminaires

Le sélecteur de filtre est destiné à placer en face de chacun des canaux neuf filtres choisis parmi une collection. Cette sélection doit pouvoir être faite à distance par l'opérateur. La précision du centrage de chaque filtre est fixée à 0,06 mm. Le temps nécessaire au changement de filtre doit être inférieur à 5 secondes.

Afin de réaliser tous ces impératifs sans avoir à résoudre de difficiles problèmes techniques, un compromis a été adopté. En effet, alors qu'il eût été souhaitable que chacun des filtres soit indépendant des autres, nous avons préféré les réaliser par groupes de neuf sur un même support. Il suffit alors de mettre en place ce dernier pour que les neuf filtres correspondants soient centrés. Cette solution apporte une appréciable simplification à la mécanique de l'appareil, sans pour cela être gênante sur le principe même.

Les supports de filtres seront eux-mêmes fixés dans des cadres métalliques usinés avec précision, afin de faciliter leur positionnement.

Le sélecteur n'est donc rien d'autre qu'un passe-vues tel que celui des projecteurs de diapositives. Cependant, du fait de la précision du positionnement souhaitée et de la sélection automatique que l'on désire effectuer, il a fallu le réaliser de toutes pièces.

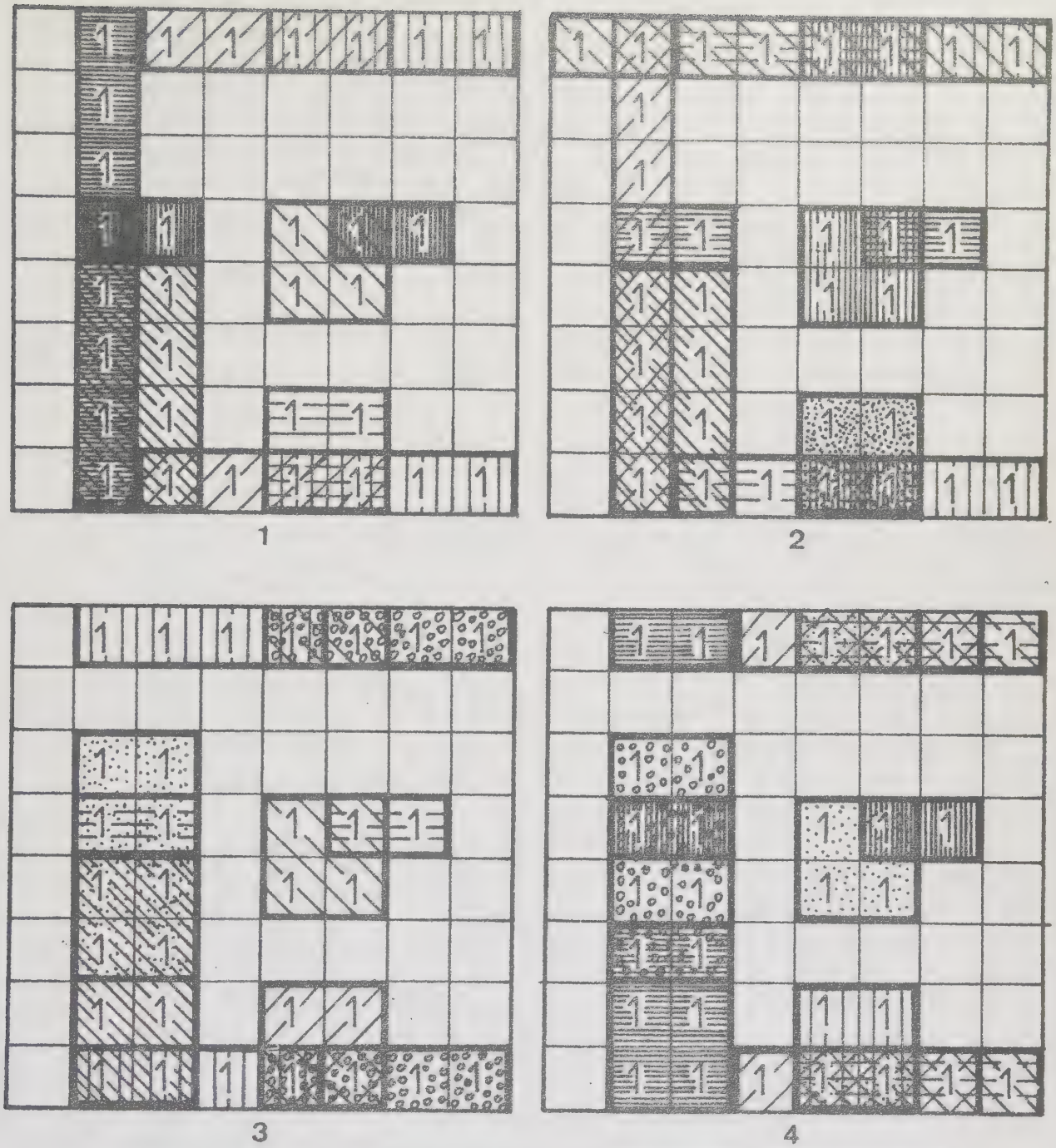


FIGURE AM 9 : Différentes possibilités de groupements du tableau de Karnaugh et les expressions de S correspondantes.

$S_1 = \bar{A}'\bar{B}'C'+A\bar{A}'C'+\bar{B}\bar{C}B'+\bar{B}\bar{C}A'+A\bar{B}A'B'+B\bar{C}A'B'+\bar{A}B\bar{C}C'$

$S_2 = \bar{A}'\bar{B}'C'+\bar{A}BC+\bar{B}\bar{C}B'+\bar{B}\bar{C}A'+\bar{C}A'B'+\bar{A}B\bar{C}C'+A\bar{B}A'B'+A\bar{A}'C'$

$S_3 = B\bar{A}'\bar{C}'+A\bar{A}'\bar{C}'+\bar{B}\bar{C}A'+\bar{C}A'B'+\bar{B}\bar{C}\bar{A}'C'+\bar{B}\bar{C}B'\bar{C}'+A\bar{B}A'B'+\bar{A}B\bar{C}C'$

$S_4 = B\bar{A}'C'+\bar{C}A'B'+\bar{B}\bar{C}A'+\bar{B}\bar{C}B'+\bar{B}\bar{C}\bar{A}'C'+AC\bar{A}'C'+A\bar{B}A'B'+\bar{A}BC\bar{C}'$

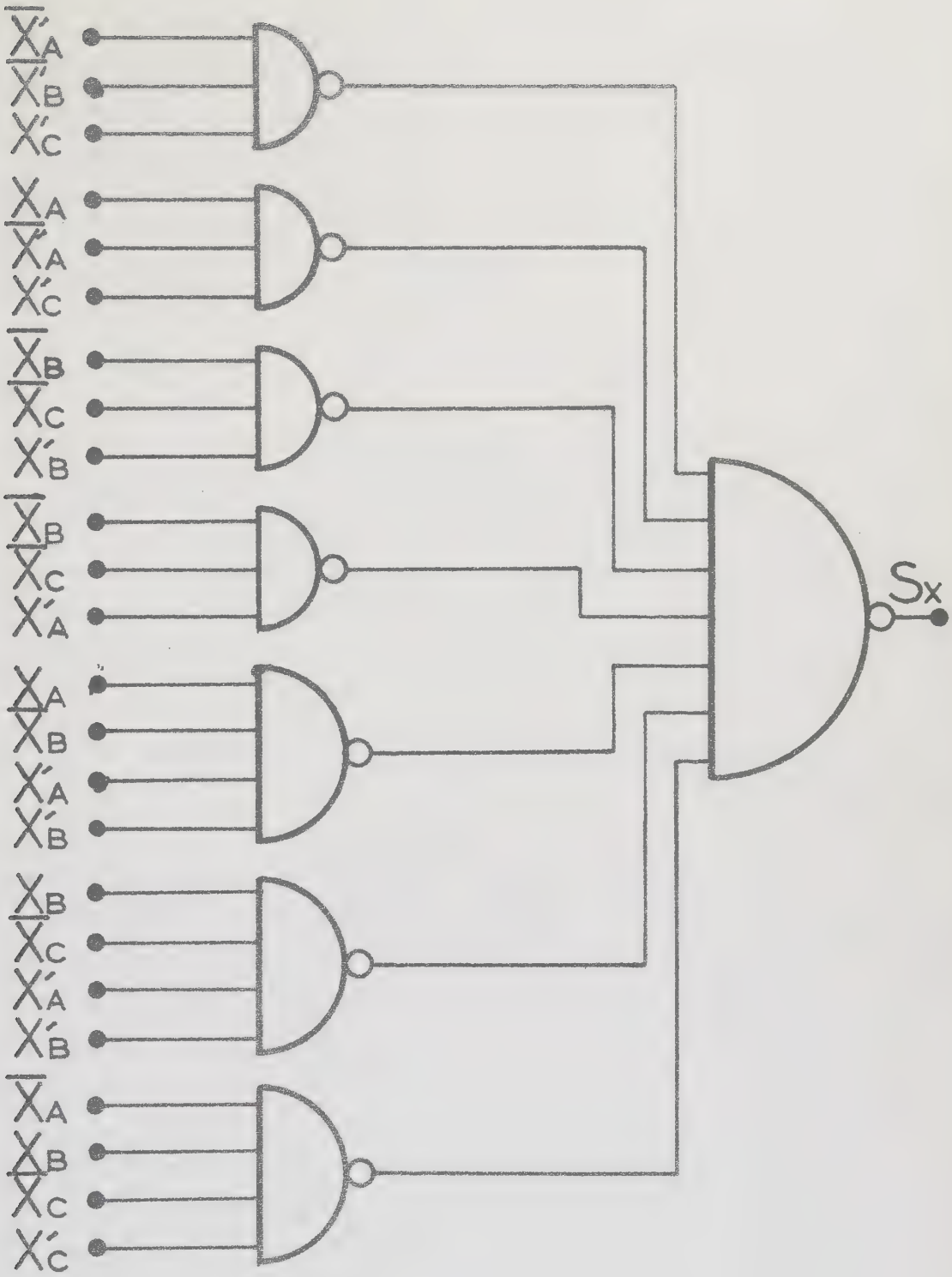


FIGURE AM 10 : Schéma du circuit logique de synthèse de la variable S_x. Les circuits réalisant les variables S_y et S_z sont identiques.

Ce passe vues comporte deux parties : un dispositif permettant de déplacer le panier où sont entreposés les filtres, et un coulisseau destiné à mettre en place le groupe de filtres sélectionnés. Ces deux fonctions sont faites automatiquement. A une solution utilisant un moteur et de nombreux éléments mécaniques réalisant les automatismes demandés, nous avons préféré affecter un moteur à chacune des fonctions et réaliser la partie automatique à l'aide d'une unité logique de commande électronique(x).

AM.IV.2. Etude de l'automatisme

L'unité logique doit déterminer les ordres à donner aux moteurs en fonction de plusieurs paramètres définis par les désirs de l'opérateur et l'état du passe-vues. Cet état est caractérisé par le numéro du groupe de filtres en place et la position du coulisseau. Cette position est repérée par deux capteurs qui délivrent les variables suivantes :

- P est au niveau logique 1 quand les filtres sont dans le panier
  " 0 ailleurs
- F est au niveau logique 1 quand les filtres sont en position de filtrage
  " 0 ailleurs

Pour repérer la position du panier, une solution analogue à celle employée pour les barrettes est utilisable. Si on dispose de cent groupes de filtres, sept capteurs sont nécessaires pour faire le codage de position ($2^7=128$). Aussi avons-nous préféré une solution qui utilise un compteur d'impulsions, ces impulsions étant générées par un capteur au passage de chaque groupe de filtres. Appelons T_p la variable associée à ce capteur.

Les trois variables P, F et T_p suffisent à déterminer les ordres à donner aux moteurs, qui sont les variables de sortie suivantes :

- M_p et S_p pour la mise en marche et le sens du moteur du panier
- M_c et S_c pour la mise en marche et le sens du moteur du coulisseau.

La variable S_p sert également à déterminer si les impulsions T_p sont à ajouter ou à retrancher du contenu du compteur. D'autre part, nous avons prévu un témoin caractérisé par la variable R, lumineux quand l'opération demandée

(x) On aurait pu utiliser une logique pneumatique ou hydraulique qui, bien que très fiables, ont l'inconvénient d'être très encombrantes.

a été effectuée.

Appelons N le contenu du filtre. Ce nombre correspond au numéro du groupe de filtres en place. Quand l'opérateur veut changer de filtres, il introduit le numéro M choisi dans l'unité logique, à l'aide de commutateurs rotatifs (roues codeuses). Afin que l'automatisme ne se déclenche pas intempestivement lors de la rotation des commutateurs, la séquence des opérations correspondant à la sélection demandée ne commence qu'après que l'opérateur ait appuyé sur un poussoir (variable D).

D'autre part, lors de la mise sous tension de l'appareil, une initialisation est nécessaire. Elle est réalisée à l'aide de la variable H qui est une impulsion positive. Avant de continuer l'étude de l'automatisme, résumons dans le tableau de la figure AM.11 les variables et leurs définitions.

AM.IV.2.a. *Synthèse des circuits logiques*

Synthèse de S_c

S_c doit passer à 1 quand $F = 1 \rightarrow F$

" 0 quand $P = 1 \rightarrow P$

On utilisera une bascule type D dont les entrées seront telles :

$D = \overline{Q}$

$Preset = \overline{F}$

$Clear = \overline{P}$

$Clock = 0$

$Q = S_c$

Commande de R

R doit passer à 1 lorsque

- $H = 1$ quand $A = 1$ et $F = 1 \rightarrow HAF$
- F passe de 0 à 1 $\rightarrow F$

R doit passer à 0 lorsque

- $H = 1$ quand $A = 1$ et $P = 1 \rightarrow HAP$
- $H = 1$ quand $A = 0$ et $F = 1 \rightarrow H\overline{A}F$
- $H = 1$ quand $A = 0$ et $P = 1 \rightarrow H\overline{A}P$
- $D = 1$ quand $A = 0 \rightarrow D\overline{A}$

V A R I A B L E S D ' E N T R E E

T_p	impulsion de comptage des filtres	une impulsion est délivrée à chaque passage de filtre
N	contenu du compteur	N en code DCB (Décimal Codé Binaire)
M	contenu du commutateur	M en code DCB
F	capteur de position du coulisseau	= 1 quand le filtre est en position de filtrage. Sinon = 0
P	capteur de position du coulisseau	= 1 quand le filtre est dans le panier. Sinon = 0
D	ordre de départ	impulsion émise quand l'opérateur appuie sur le poussoir D
H	ordre d'initialisation	impulsion émise lors de la mise sous tension
A	égalité de M et N	= 1 quand M = N

V A R I A B L E S D E S O R T I E

M_p	ordre de mise en route du moteur du panier	= 1 → moteur tourne = 0 → moteur arrêté
S_p	ordre de sens du moteur du panier	= 1 → le panier se déplace dans le sens des N croissants, = 0 dans l'autre sens
M_c	ordre de mise en route du moteur du coulisseau	= 1 → moteur tourne = 0 → moteur arrêté
S_c	ordre de sens du moteur du coulisseau	= 0 → le filtre va vers le panier = 1 → autre sens
R	voyant de fin d'opération	= 0 quand des opérations sont en cours = 1 quand les opérations sont terminées

Figure AM.11 - Tableau récapitulatif des Variables du Sélecteur de Filtres

On utilisera une bascule type D brochée comme suit :

$$\begin{cases} D = \overline{Q} \\ \text{Preset} = \overline{HAF} \\ \text{Clear} = \overline{H(B+\overline{A}C)+D\overline{A}} \\ \text{Clock} = F \\ Q = R \end{cases}$$

Synthèse de M_c

M_c doit passer à 1 lorsque :

- H = 1 quand A = 1 et P = 1 → HAP
- H = 1 quand A = 0 et F = 1 → $H\overline{A}F$
- D = 1 quand A = 0 → $D\overline{A}$
- A passe de 0 à 1

M_c doit passer à 0 lorsque :

- P passe de 0 à 1
- F passe de 0 à 1
- H = 1 quand A = 1 et F = 1 → HAF

On utilisera une bascule D brochée comme suit :

$$\begin{cases} D = \overline{Q} \\ \text{Preset} = \overline{HAP + H\overline{A}F + \overline{A}D} \\ \text{Clear} = \overline{HAF} \\ Q = M_c \end{cases}$$

Quant à l'entrée Clock, elle doit recevoir un front montant à chaque front montant de A, de P et de F. Une solution simple consiste à utiliser des monostables déclenchés sur des fronts montants de A et P et délivrant des impulsions T_A et T_p.

On aura alors :

$$\text{Clock} = F + T_A + T_p$$

Synthèse de M_p

M_p doit passer à 1 lorsque :

- H = 1 quand A = 0 et P = 1 → $\overline{A}BH$
- P passe de 0 à 1 → T_p

M_p doit passer à 0 lorsque :

- A passe de 0 à 1 → T_A
- H = 1 quand A = 1 et P = 1 → HAP
- H = 1 quand A = 0 et F = 1 → $H\overline{A}F$

On utilisera une bascule D brochée comme suit :

$$D = \overline{Q}$$

$$\text{Preset} = \overline{H\overline{A}B}$$

$$\text{Clear} = \overline{H\overline{A}F + HAP}$$

$$\text{Clock} = T_A + T_p$$

$$Q = M_p$$

Synthèse de S_p

S_p doit être = 1 quand M > N

S_p doit être = 0 quand M < N.

Quand M = N la valeur de S_p est indépendante.

S_p sera donné directement sur une broche du comparateur que l'on utilisera pour déterminer A. La figure AM.12 montre les schémas des circuits de synthèse.

AM.V. REALISATION

AM.V.1. Mécanique

Toutes les pièces mécaniques fixes ont été réalisées en dural. Les pièces mobiles l'ont été en laiton afin d'éviter les frottements dural/dural. Les plans de toutes ces pièces sont visibles dans l'annexe technique, ainsi qu'une vue générale montrant leur assemblage.

AM.V.2. Electronique

Le schéma général du dispositif est représenté sur la figure AM. 3. Seuls les moteurs et les capteurs ont été fixés sur l'unité active de l'appareil, tout le reste étant monté dans le Rack de contrôle.

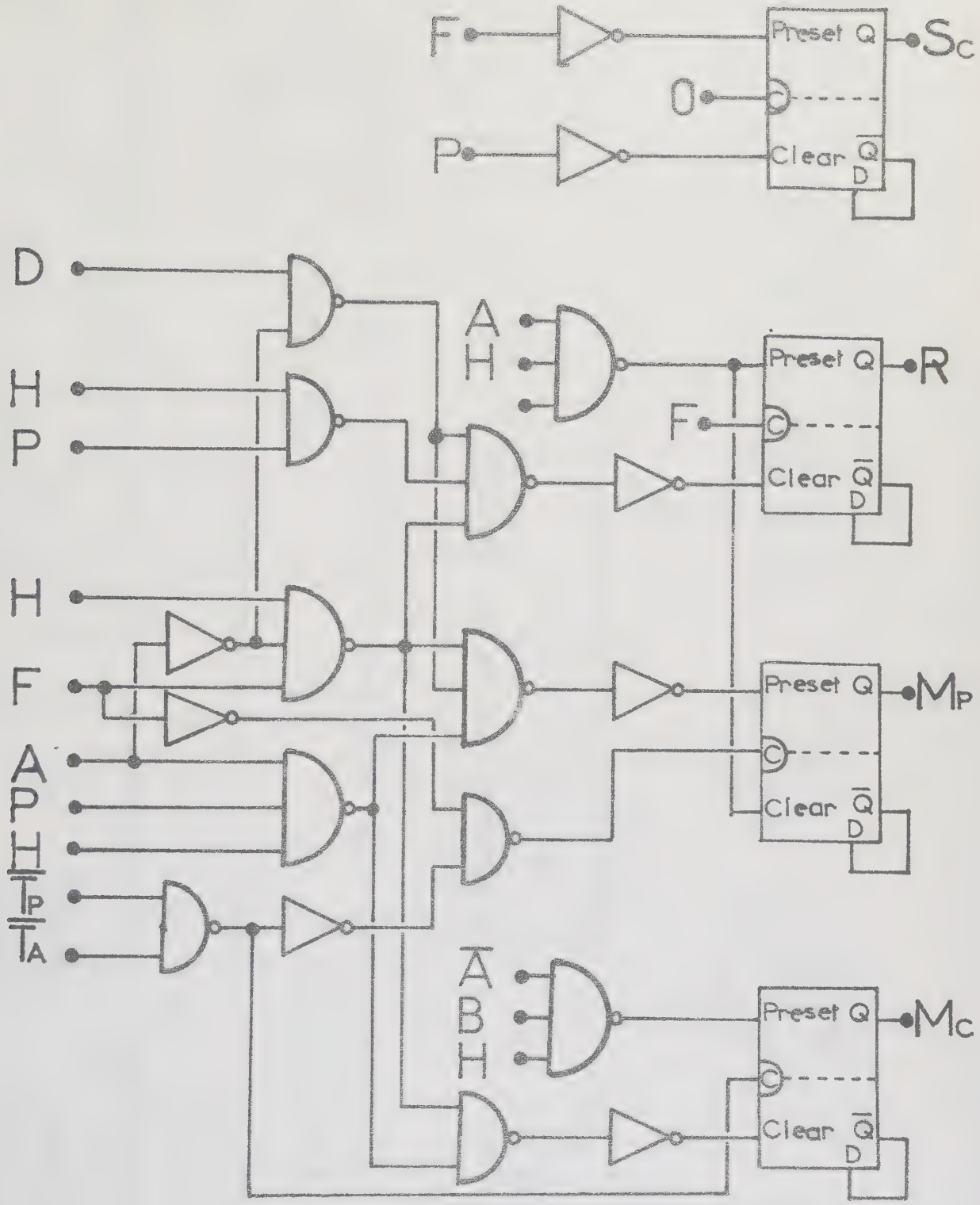


FIGURE AM 12 : Schéma du circuit logique de commande des bascules du sélecteur de filtres.

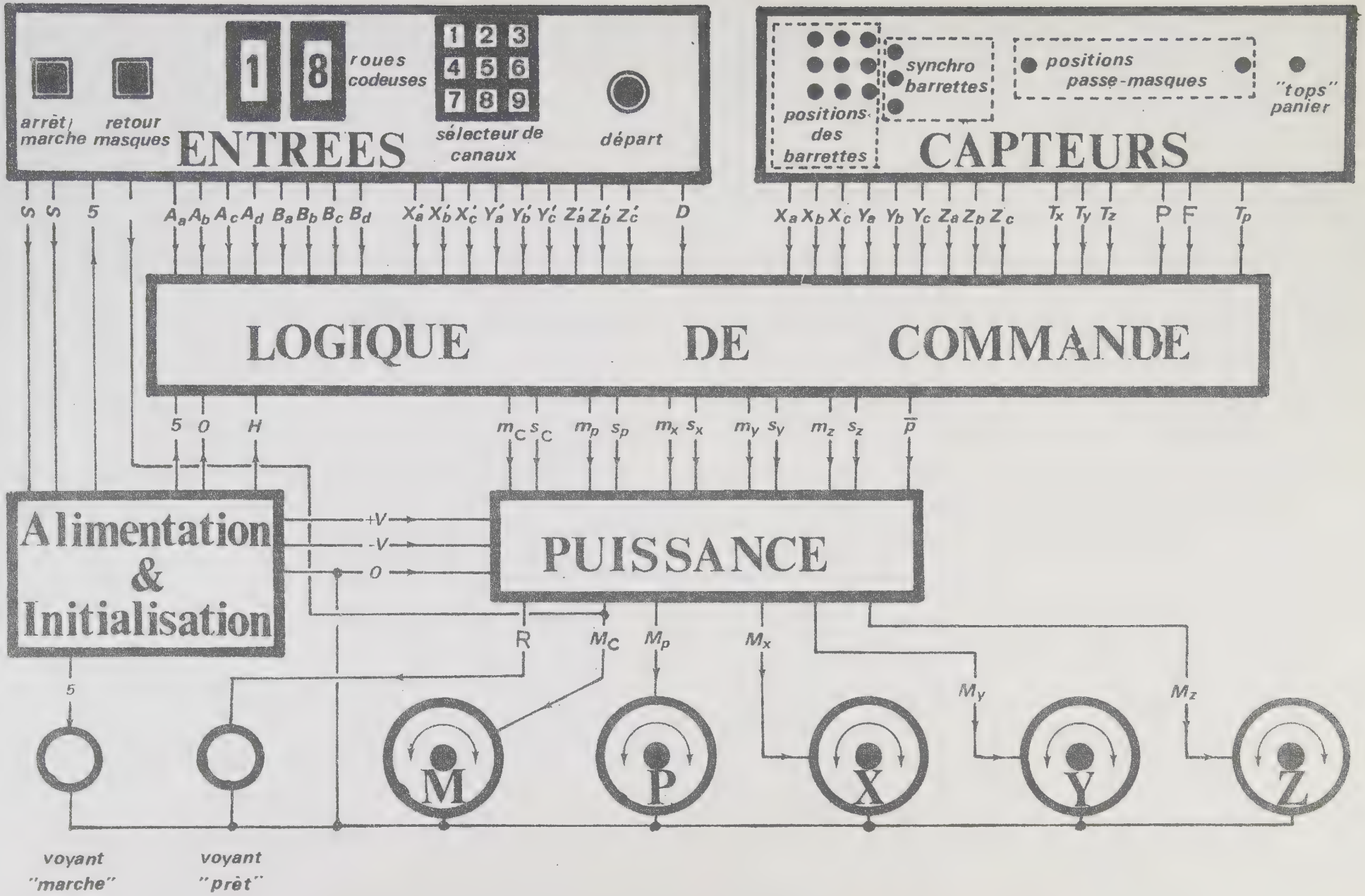


FIGURE AM 13 : Schéma général de l'appareil montrant les interconnections.

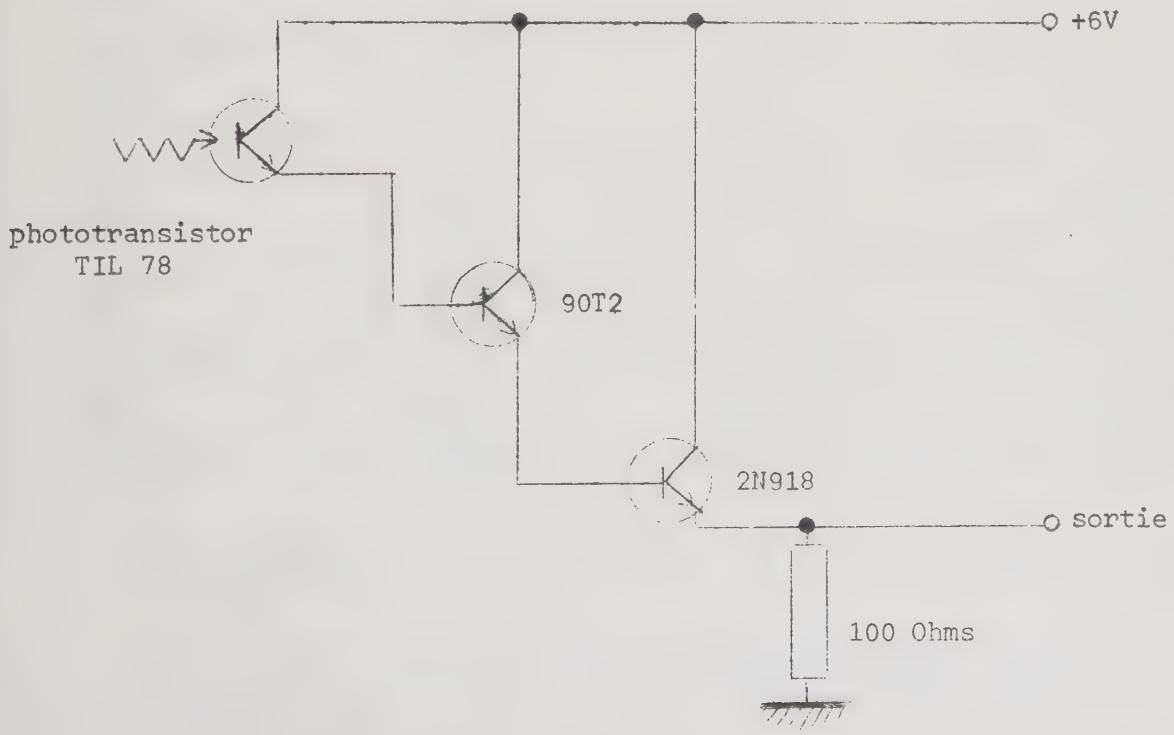
AM.V.2.a. Les circuits logiques

Tous les circuits logiques ont été câblés sur une seule carte contenant 48 circuits intégrés. La figure AM.14 montre la disposition des circuits sur la plaquette, ainsi que les points de connexion de la carte. Les figures AM.15, 16 et 17 représentent les circuits logiques de synthèse du sélecteur de canaux. Les numéros des circuits correspondent à l'implantation de la figure AM.13. La figure AM.18 est le circuit logique du sélecteur de filtres. La figure AM.19 montre une vue de la carte logique câblée. Elle sera montée dans le rack à l'intérieur d'un blindage efficace en cuivre.

AM.V.2.b. Les interfaces

Tous les interfaces sont les éléments placés entre les capteurs et actionneurs et les variables d'entrée-sortie de l'unité logique. Ce sont en sortie les commandes de puissance, et en entrée les adaptations de niveaux.

- *Les capteurs*. Ce sont des phototransistors qui seront ou non éclairés selon qu'une partie mobile masque ou non les lampes qui leur font vis-à-vis. Afin que les niveaux de tension et de courant soient compatibles avec les circuits logiques, un amplificateur est nécessaire à chaque photo-transistor. Le circuit amplificateur utilisé est le suivant



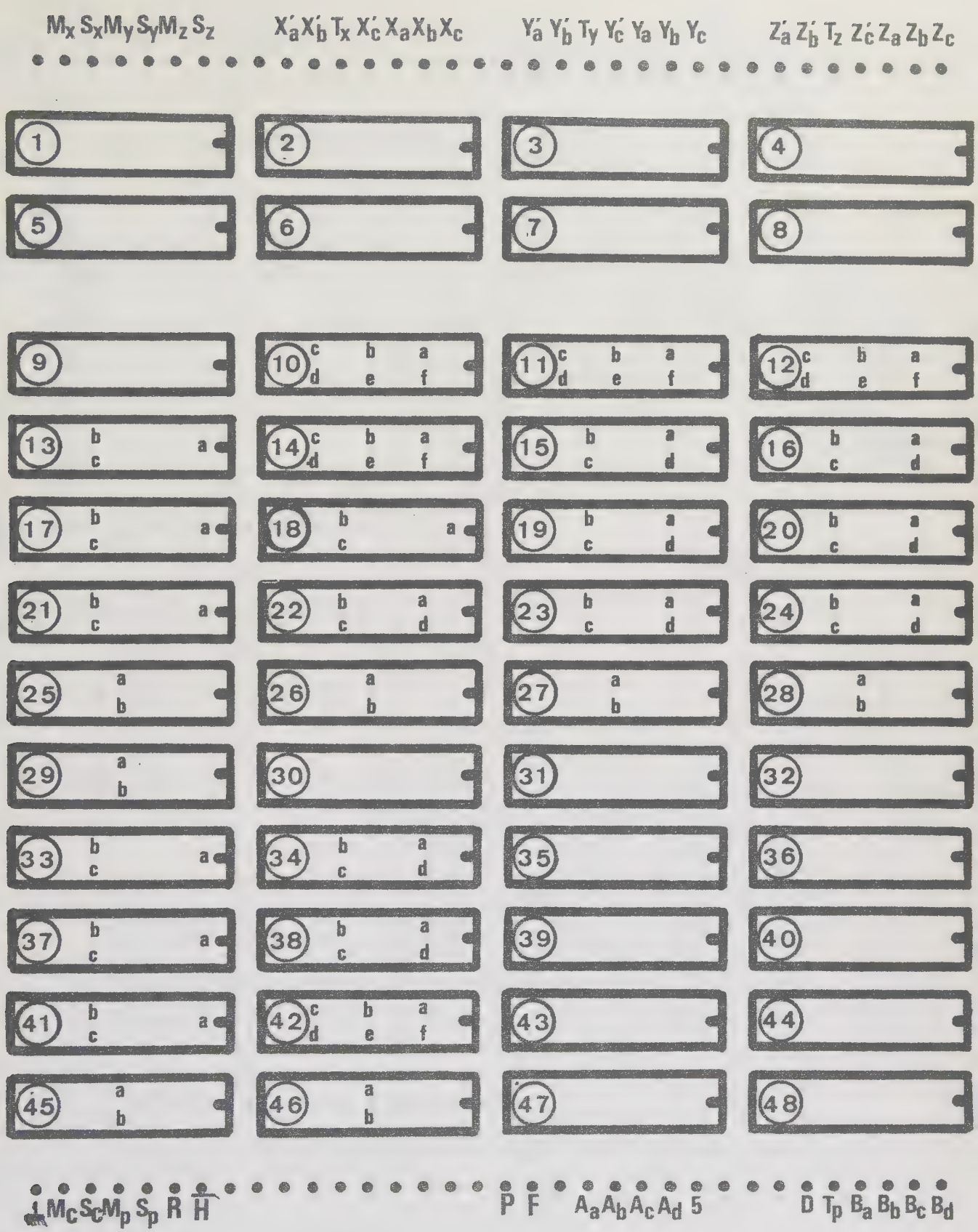


FIGURE AM 14 : Schéma d'implantation des circuits intégrés de la carte de logique de commande.

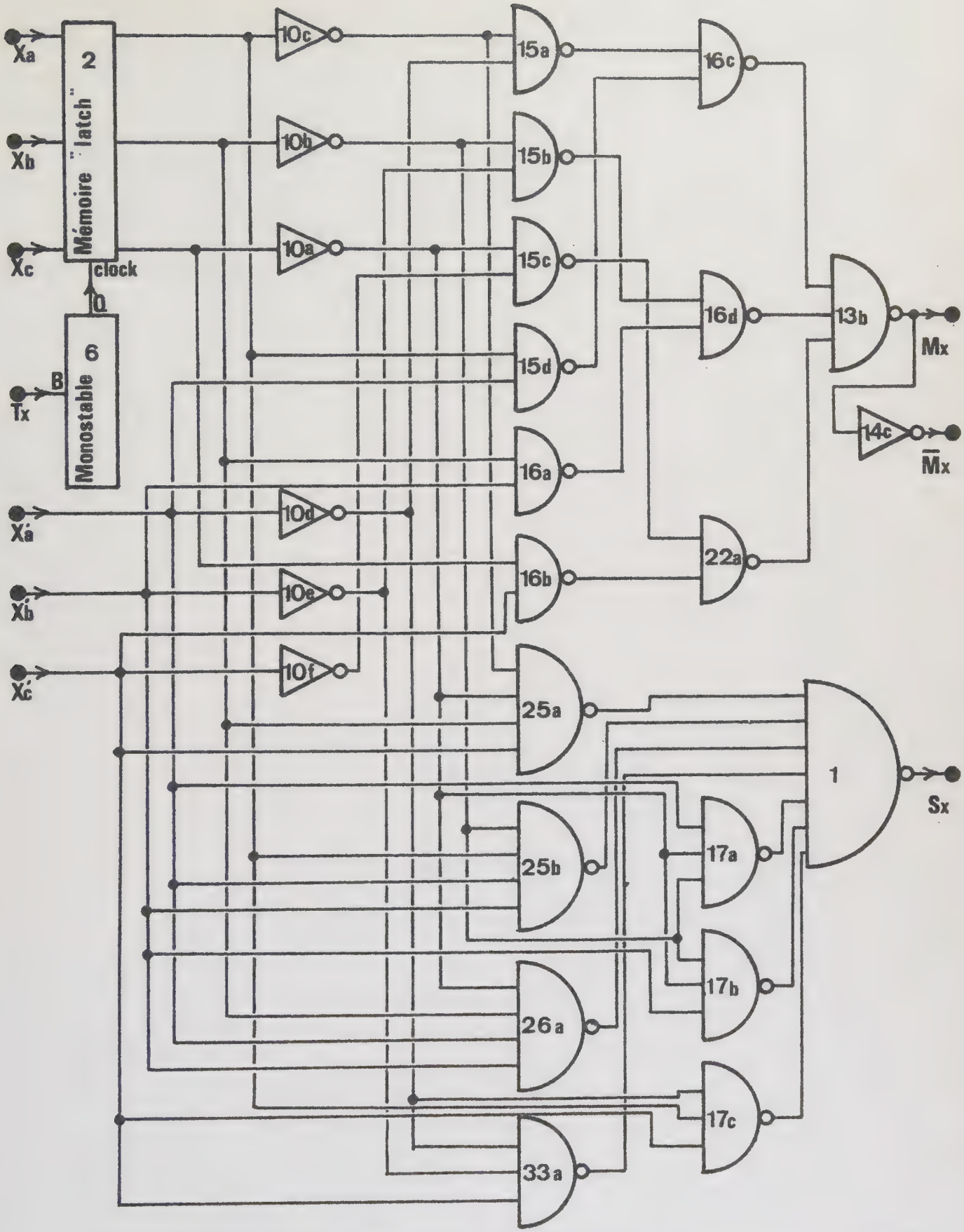


FIGURE AM 15 : Schéma et implantation des éléments du circuit de synthèse des variables M_x et S_x.

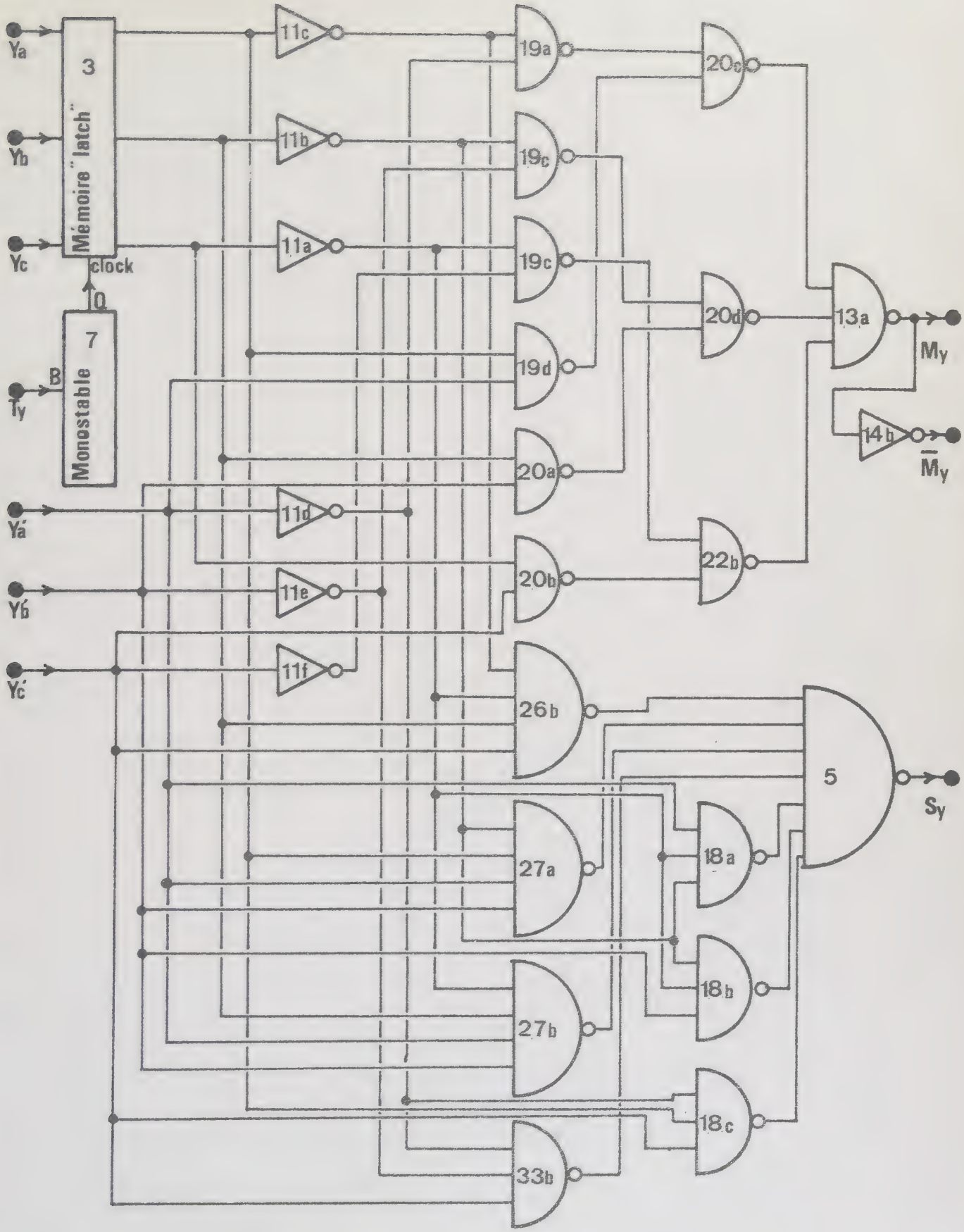


FIGURE AM 16 : Schéma d'implantation des éléments du circuit de synthèse des variables M_y et S_y.

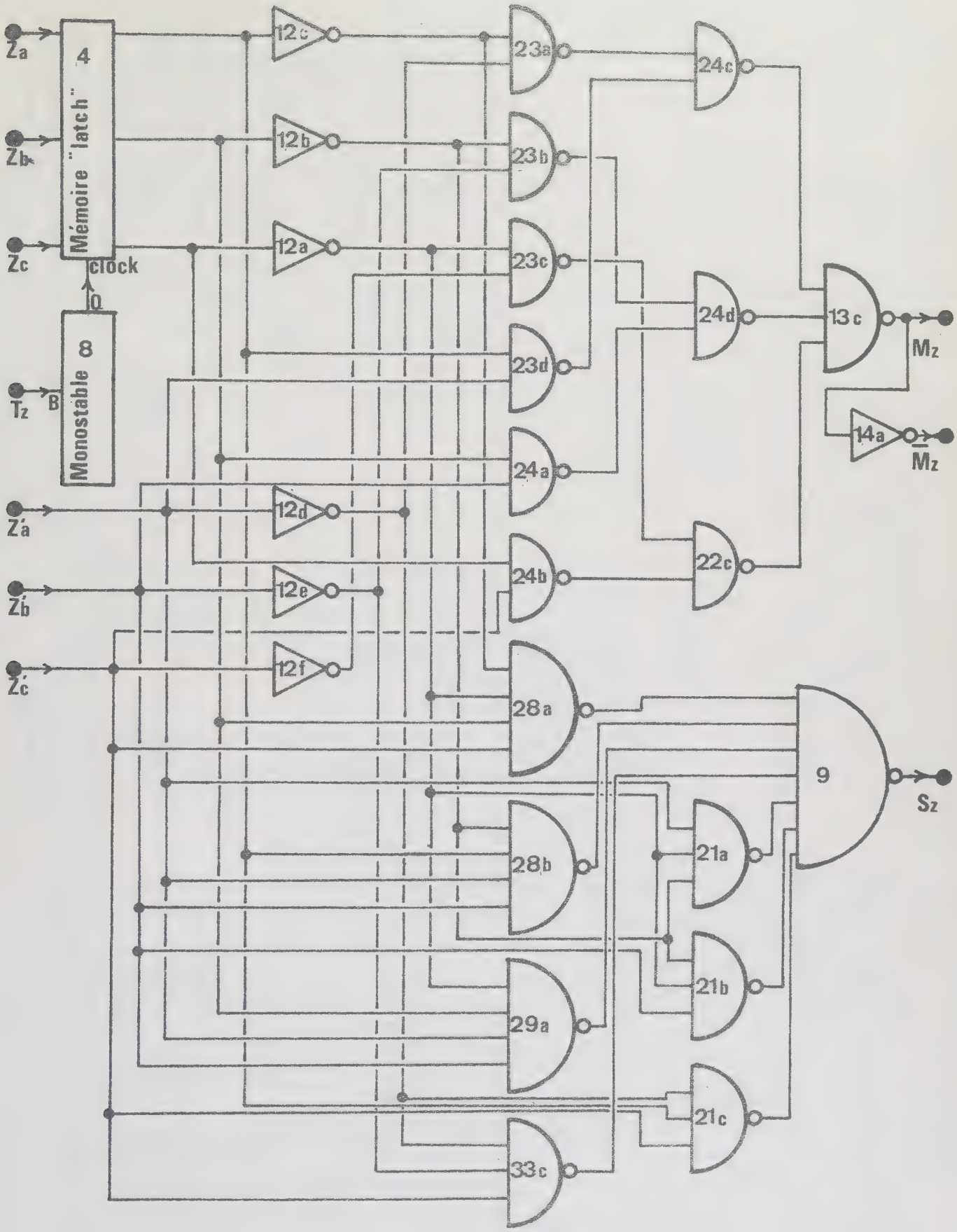


FIGURE AM 17 : Schéma et implantation des éléments du circuit de synthèse des variables M_z et S_z.

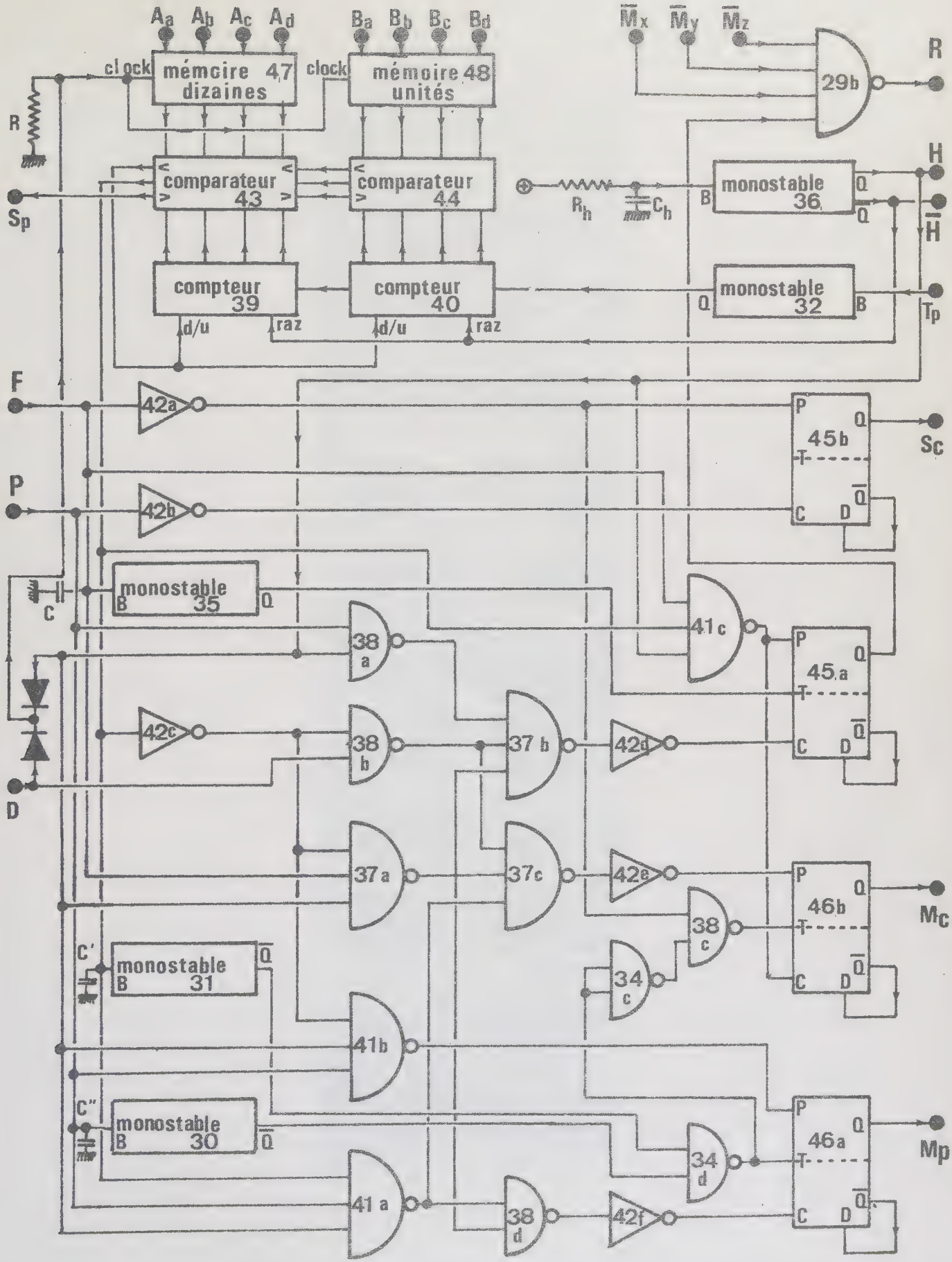


FIGURE AM 18 : Shéma et implantation des éléments des circuits de synthèse des variables M_c,S_c,M_p,H et R.

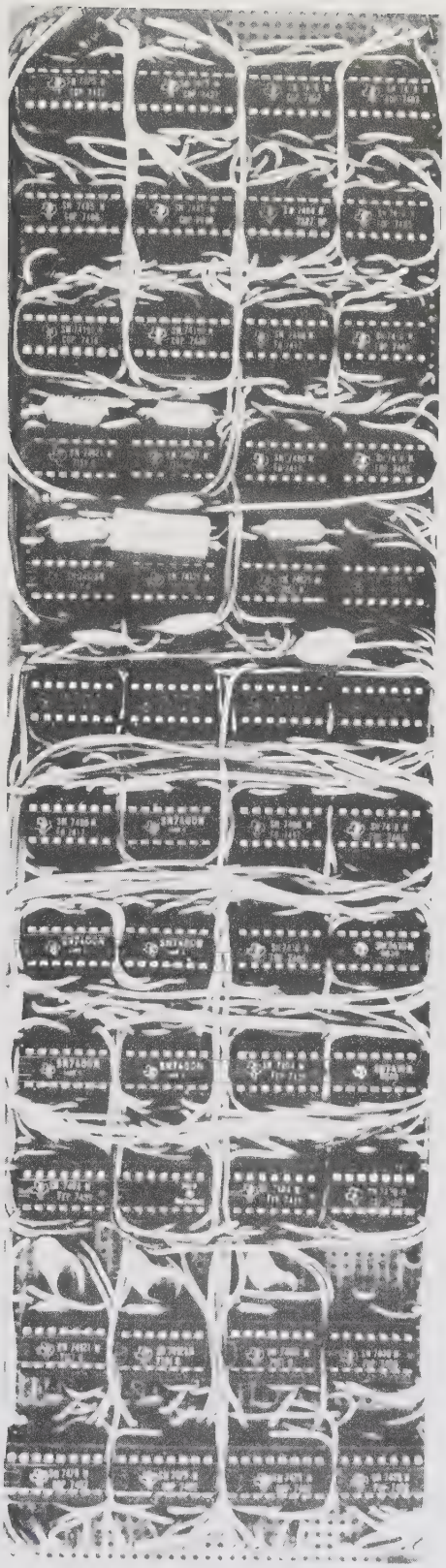
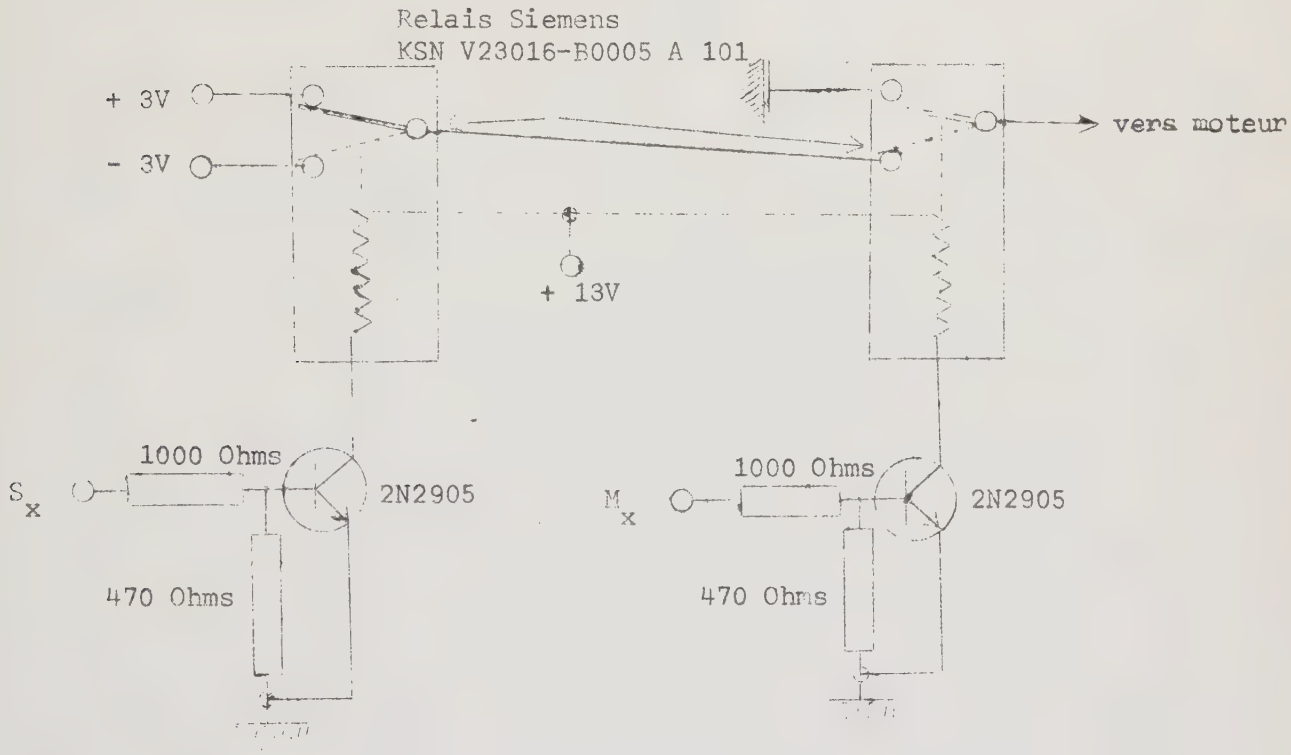


FIGURE AM 19 : Carte contenant tous les circuits de logique.

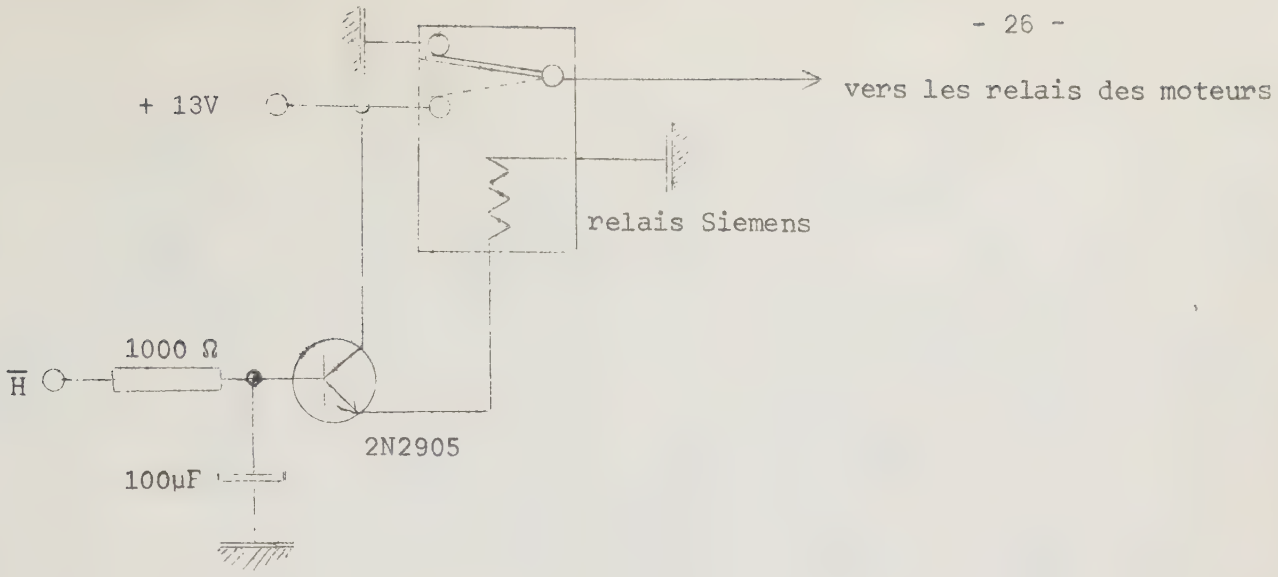
Les 15 circuits amplificateurs nécessaires aux 15 phototransistors utilisés sont placés sur l'unité active, dans un blindage. Cette solution évite le transfert d'informations logiques entre l'unité active et l'unité logique sous forte impédance, ce qui serait cause de nombreux phénomènes parasites.

- *Les circuits de puissance*. Ce sont ceux qui, à partir des variables de sortie de l'unité logique, permettent de piloter les moteurs. Une solution consisterait à utiliser un montage à transistors. Cependant, pour chaque moteur un minimum de quatre transistors de puissance est nécessaire. Nous n'avons donc pas adopté ce système et avons préféré un système utilisant des relais. Le schéma de commande d'un moteur est représenté ci-dessous.



Afin d'éviter un démarrage intempestif des moteurs lors de la mise sous tension, un circuit temporisateur doit retarder l'alimentation des relais. Ce circuit est commandé par le signal H d'initialisation à l'aide du montage ci-après.

Les 6 relais et leurs dispositifs de commandes sont montés sur une carte indépendante.



AM.V.2.c. Les alimentations

Afin de fournir la puissance électrique nécessaire au fonctionnement de l'appareil, nous avions besoin des alimentations suivantes :

- 5 Volts 3 Ampères stabilisés à ± 200 mV pour la logique et les témoins du clavier,
- 13 Volts 300 mA stabilisés à 1 V pour les relais,
- 6 Volts 2 Ampères stabilisés à ± 200 mV pour alimenter les ampoules des capteurs,
- + 3 Volts - 3 Volts 7 Ampères redressés filtrés pour fournir la puissance aux moteurs.

Ces alimentations ont été réalisées selon le schéma de la figure AM.20. Les transistors de puissance sont montés sur un dissipateur de chaleur efficace, et les autres éléments sur une troisième carte, dont une vue est représentée sur la figure AM.21

AM.V.3. Les interconnexions

Tous les éléments de la logique de commande ont été montés dans un rack visible sur la figure AM.22. Afin de pouvoir facilement extraire le panier de filtres en fin d'opérations, nous avons ajouté une commande manuelle. En tournant ce commutateur, on effectue les opérations suivantes :

1°) arrêt de l'automatisme,

2°) mise en place du filtre dans le panier,

3°) évacuation du panier,

4°) mise en position automatique (voyant allumé).

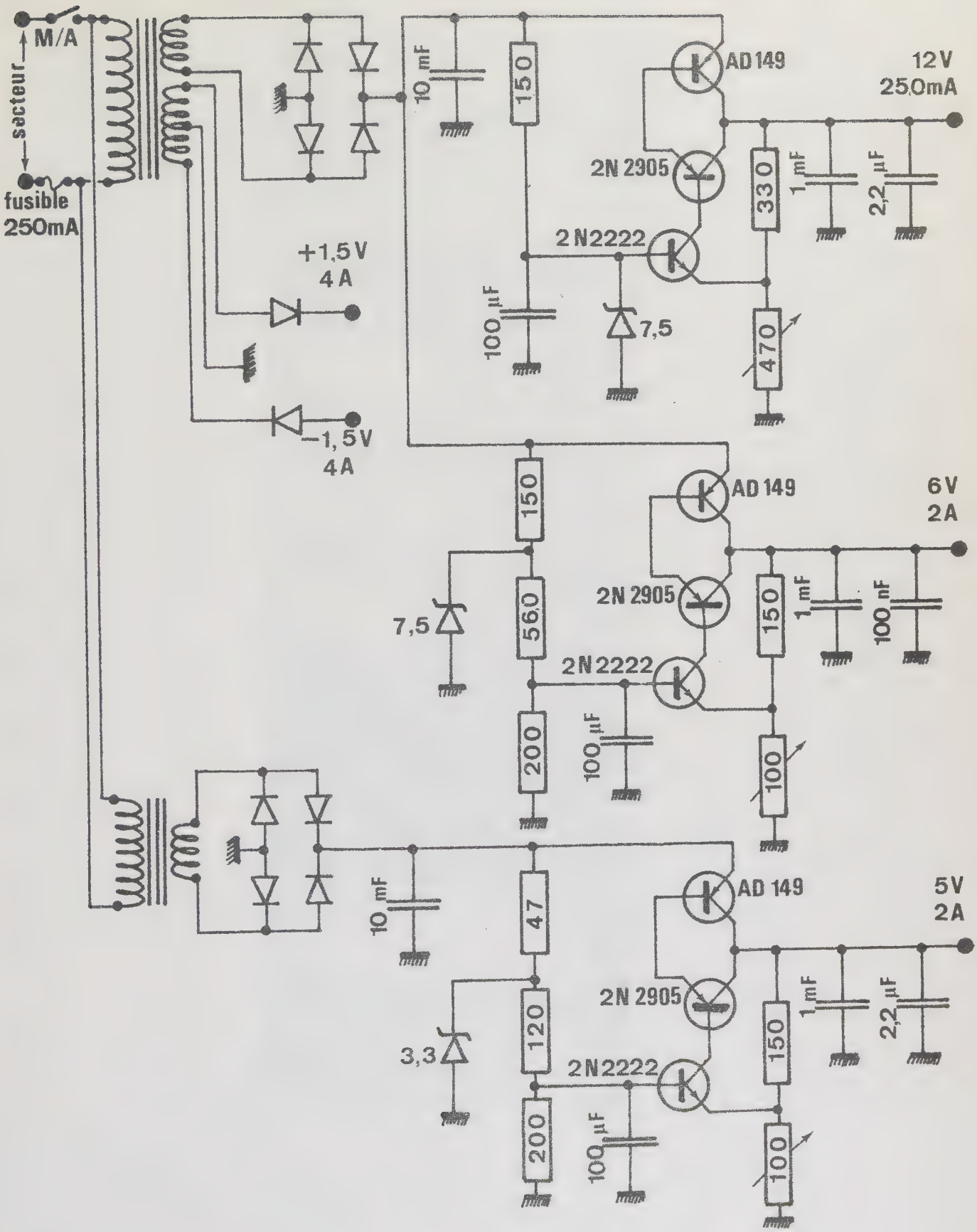


FIGURE AM 20 : Schéma des circuits d'alimentation.

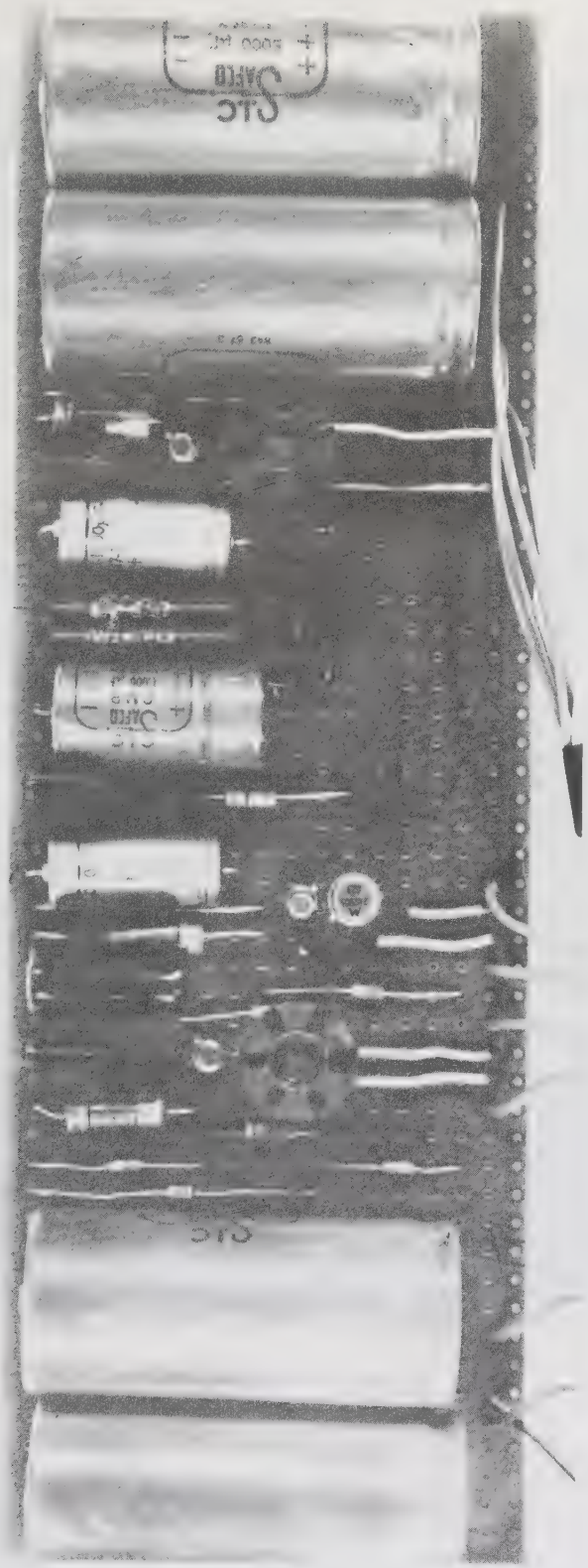


FIGURE AM 21 : Carte des circuits d'alimentation.

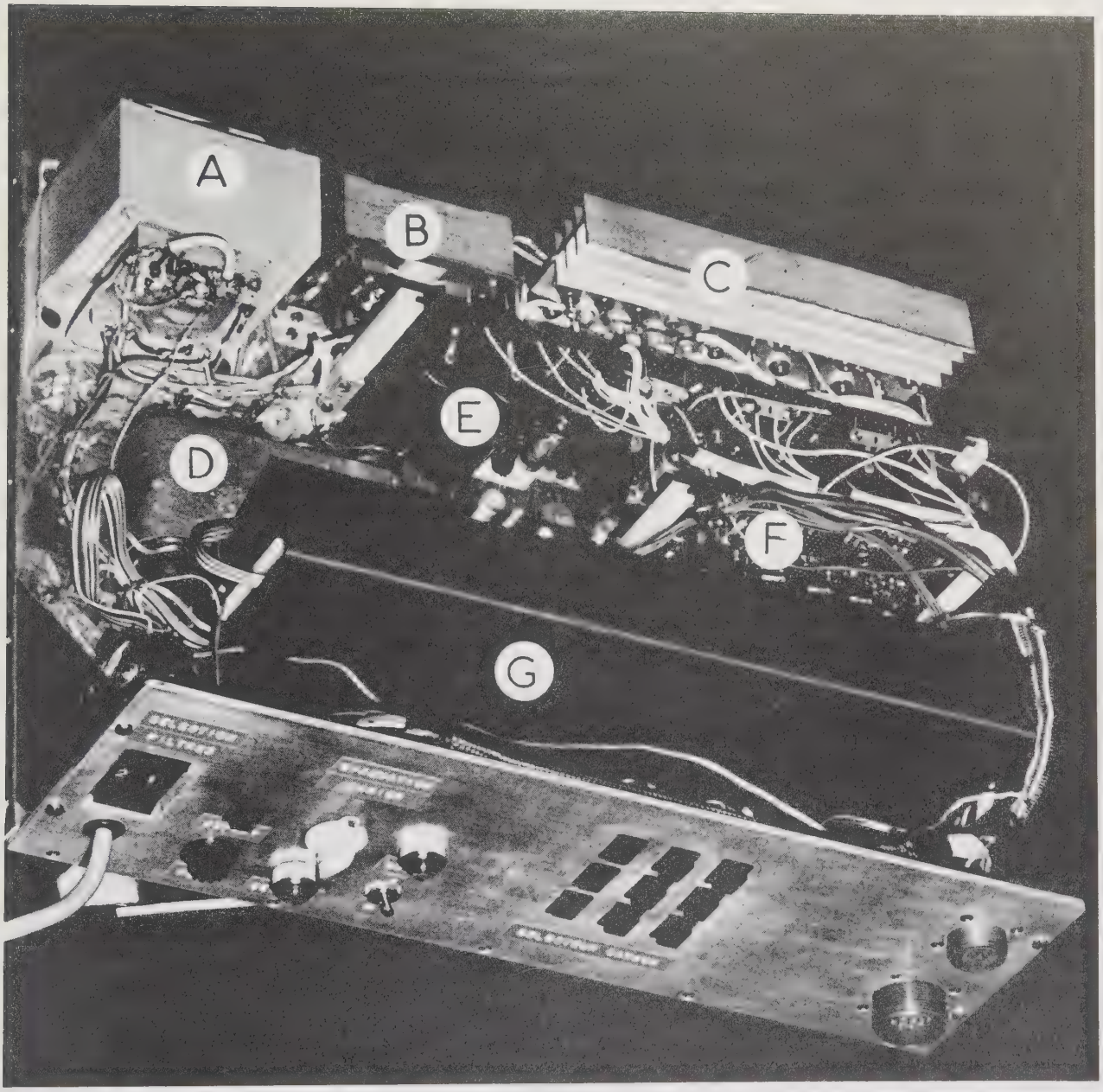


FIGURE AM 22 : Vue de l'unité de commande.

Sur la face avant du rack on trouve donc les commandes suivantes, disposées comme on peut le voir sur la figure AM.23 :

1°) commutateur de sélection des filtres,

2°) fusible secteur,

3°) bouton-poussoir de départ de changement de filtre. Témoin lumineux de fin d'opération,

4°) témoin de mise sous tension,

5°) commutateur d'évacuation du panier,

6°) interrupteur général,

7°) témoin de position automatique,

8°) clavier de sélection des canaux,

9°) connecteurs d'entrée et de sortie.

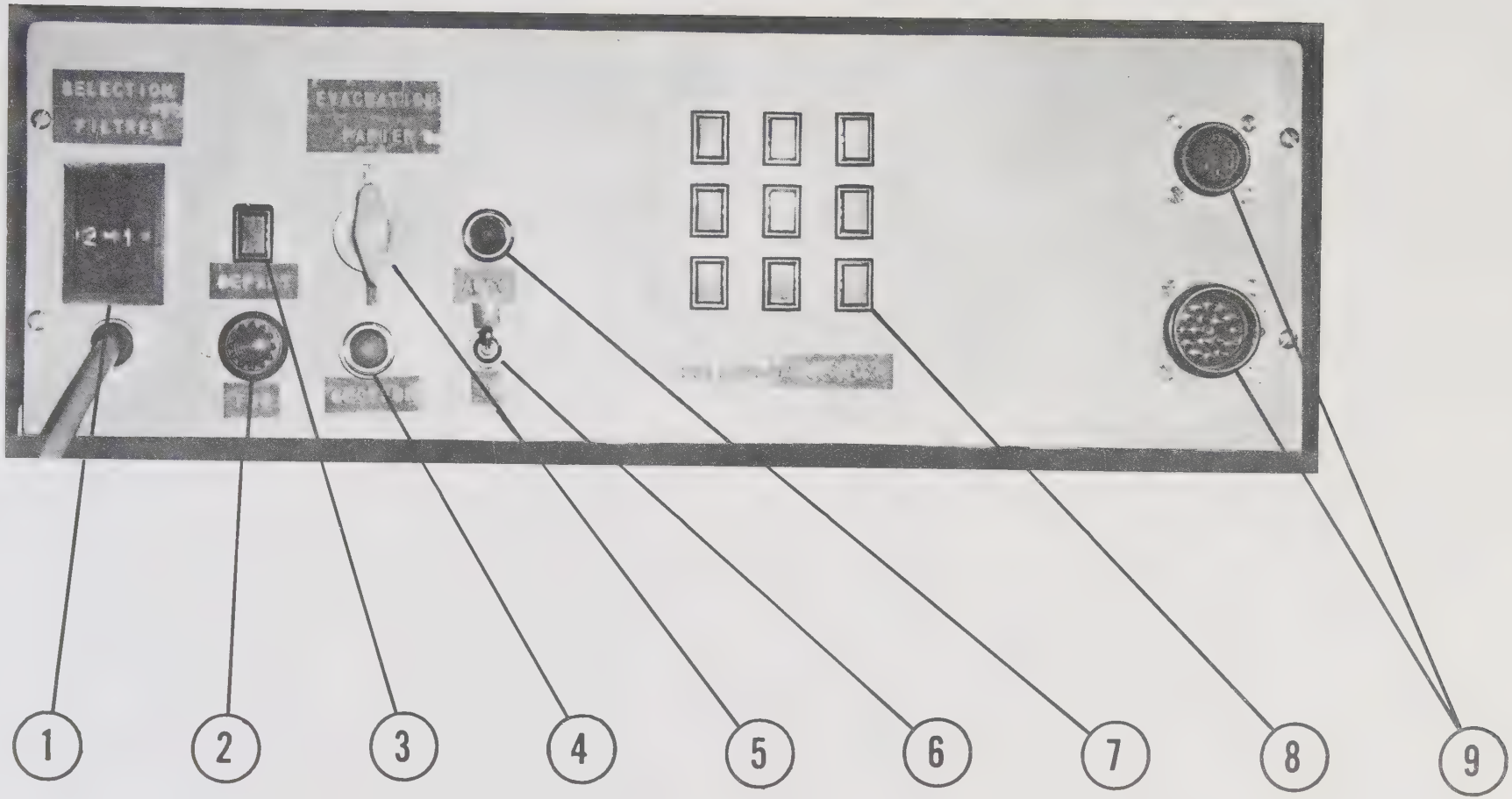


FIGURE AM 23 : Implantation des organes de commande.

AM.VI. ETUDE ET REALISATION DES FILTRES

Nous avons précisé au chapitre FC que deux types différents de filtres pourront être utilisés, selon que l'on désire effectuer un traitement d'image, ou des opérations de corrélation. Dans le premier cas, on utilisera des filtres d'amplitude, alors que dans le second, ce seront des filtres-hologrammes.

AM.VI.1. Les filtres d'amplitude

AM.VI.1.a. Caractéristiques souhaitées

Les filtres utilisés pour ce type d'opération seront des masques binaires, fonctionnant en "tout-ou-rien". Ils doivent en conséquence présenter les caractéristiques suivantes :

- densité maximale (au moins 3) dans les régions opaques,
- densité minimale dans les régions transparentes,
- diffusion minimale,
- phase constante sur toute la surface des zones transparentes.

AM.VI.1.b. Méthode de réalisation

Afin de satisfaire rigoureusement aux impératifs ci-dessus, la solution consistant à réaliser les filtres par découpage des zones transparentes dans un support opaque semble parfaite. Cependant, s'il est aisé d'obtenir un trou dans un support pour faire un filtre passe-bas, il est difficile de réaliser un filtre passe haut de cette manière. Aussi, nous avons choisi la solution de filtres réalisés sur plaques photographiques à supports rigides.

Afin d'obtenir de très fortes densités, une bonne définition, et un état de surface du support présentant le moins d'irrégularités possible, de nombreux types de récepteurs photographiques ont été examinés.

La solution finalement adoptée est d'utiliser des plaques holographiques type 10 E 75 fixées dans des cadres métalliques (x) destinés à les positionner avec précision dans l'appareil multicanal.

(x) Voir plan en annexe

La méthode de réalisation des filtres est rapportée ci-dessous :

1°) dessin en fort contraste sur rhodoïd, à l'échelle 10, de l'ensemble des 9 filtres et des repères de coupe et de cadrage,

2°) reproduction à l'échelle 1 sur plan-film très contrasté (Kodaline par exemple),

3°) tirage par contact sur plaque holographique 10 E 75. Cette opération doit être effectuée avec beaucoup de soin. Il est recommandé d'utiliser plusieurs bains successifs de fixateur neuf, de laver longtemps à grande eau puis à l'eau distillée, afin d'éliminer toutes traces d'impuretés dans la gélatine, qui introduiraient par diffusion un bruit important,

4°) découpage des plaques au format 35 x 35 défini par les repères de coupe,

5°) collage dans les cadres métalliques. Le positionnement est fait à l'aide d'un microscope, par coïncidence des repères du cadre et du filtre.

AM.VI.1.c. Données numériques

L'étalonnage des fréquences spatiales dépend de la longueur focale de l'objectif utilisé pour la formation du spectre, ainsi que de la longueur d'onde utilisée. On sait en effet que l'angle de diffraction de l'ordre + 1 d'un réseau de pas a est donné par la relation : $\sin i = \frac{\lambda}{a}$. Dans le plan du spectre formé par un objectif de focale f, cet ordre +1 se trouvera donc à une distance x de l'axe optique donnée par : $\frac{x}{f} = \frac{\lambda}{a} = \sin i$

On a donc $x = \frac{\lambda f}{a}$

La fréquence spatiale F étant liée à l'interfrange par la relation $F = \frac{1}{a}$, on a finalement $x = \lambda f F$ ou $F = \frac{x}{\lambda f}$.

L'étalonnage des filtres de fréquences spatiales est donc donné par cette relation (x).

(x) Ainsi, avec un laser He-Ne et une focale de 300 mm, une distance de 8 mm correspond à une fréquence spatiale égale à environ 42 l/mm.

AM.VI.1.d. *Types de filtres réalisés*

Afin de réaliser les principales opérations de traitement par filtrage d'amplitude, il est nécessaire de disposer des filtres suivants, chacun pouvant d'ailleurs être réalisés avec ou sans cache strioscopique :

- passe-bande, à fréquence centrale et largeur de bande diverses,
- coupe-bande, à fréquence centrale et largeur de bande diverses,
- passe-haut, à fréquence de coupure diverse,
- passe-bas, à fréquence de coupure diverse,
- passe-direction, à direction et angle sélectionnés divers,
- coupe-direction, à direction et angle bloqués divers.

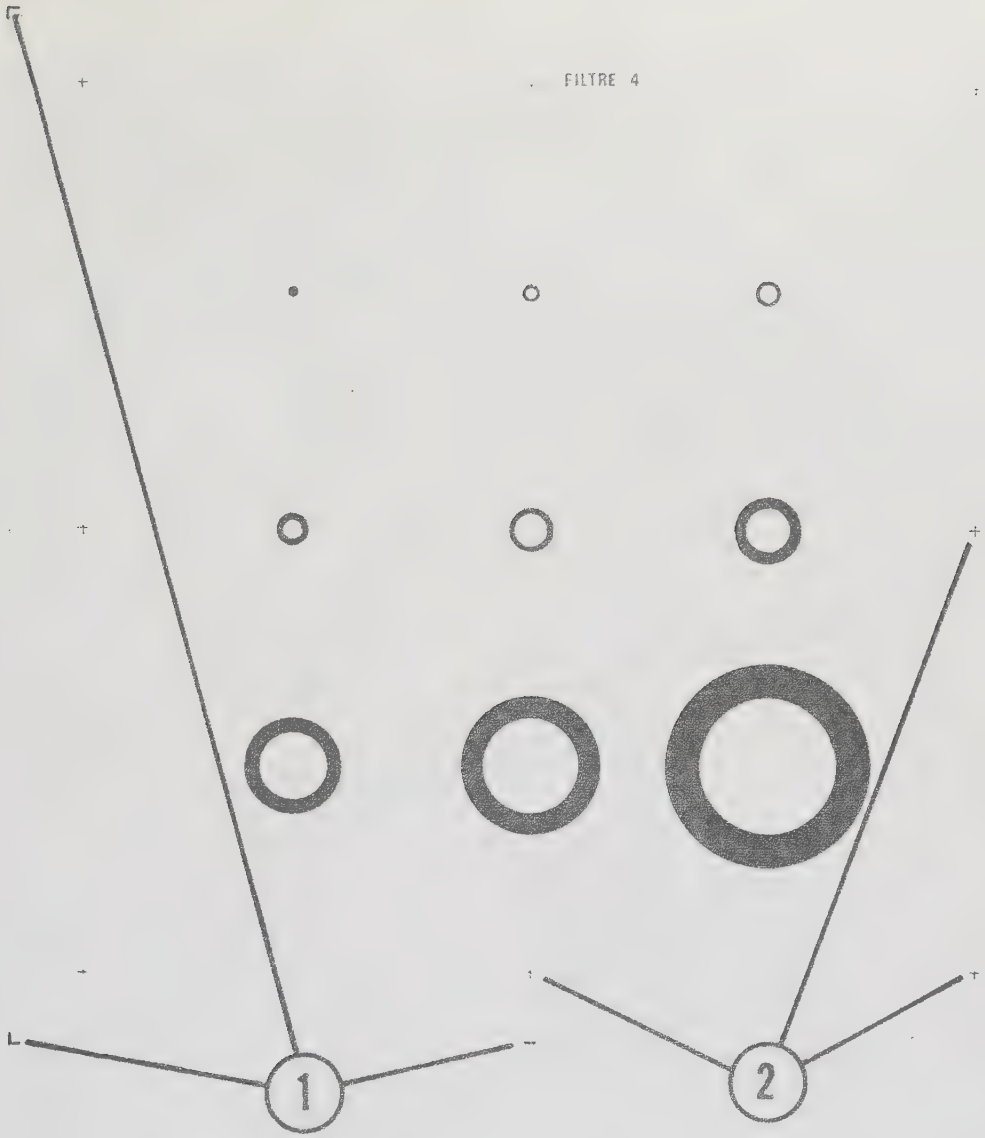
Cette liste n'est pas limitative, mais elle permet de résoudre la majorité des problèmes. Cependant, pour certains problèmes particuliers, il faudra réaliser des filtres "sur mesure".

Nous avons réalisé une série de filtres, dont les caractéristiques sont précisées dans la notice d'utilisation de l'appareil. Sur la figure AM.24, on voit un exemple de filtre. Les repères 1 et 2 sont destinés au découpage et au cadrage. Les caractéristiques de filtrage de ce groupe sont notées au tableau. F représente la fréquence spatiale correspondant à une distance au centre de 3 mm. Les neuf filtres étant des filtres du type coupe-bande, nous avons appelé Fo la fréquence centrale et ΔF la largeur de la bande coupée.

On peut voir sur la photo AM.25 les filtres tels qu'ils sont montés dans les cadres métalliques.

AM.VI.2. Les filtres-hologrammes

Comme il a été précisé au chapitre FC, cette seconde catégorie de filtres est destinée à effectuer des opérations de corrélation, dont la principale application est la reconnaissance des formes. Chaque filtre est donc adapté à un problème particulier, contrairement aux filtres précédents.



Filtre n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F_0(% F)	1,25	3,8	5,8	6,8	9,6	15	23	33	95
ΔF(% F)	2,5	1,7	2,2	3,3	3,3	6,7	8,3	1,2	1,9

FIGURE AM 24 : Exemple de matrice de filtre. Il s'agit d'une série de filtres coupe-bandes dont les caractéristiques sont précisées sur le tableau.

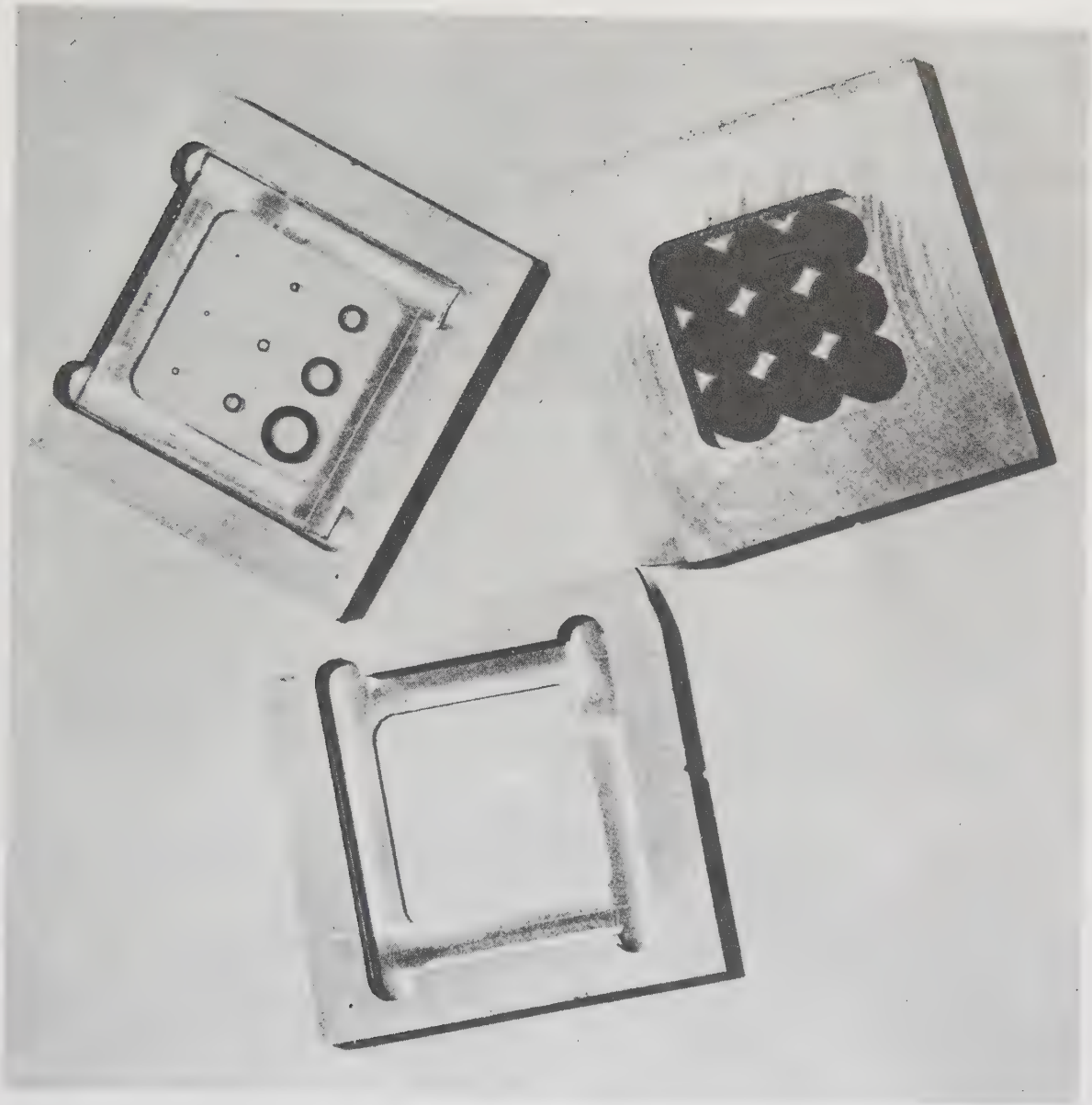


FIGURE AM 25 : Exemples de filtres opérationnels et cadre seul.

La méthode de réalisation est décrite ci-dessous ; elle utilise une grille multiplicatrice adaptée au montage optique (x), et le montage d'enregistrement représenté sur la figure AM.26 :

1°) découpage et collage d'un support holographique dans un cadre métallique de l'appareil multicanal,

2°) mise en place de l'ensemble dans le plan du spectre à l'aide de l'appareil automatique,

3°) mise en place, dans le plan d'entrée, d'un objet superposé à la grille multiplicatrice correctement orientée,

4°) enregistrement d'un hologramme à travers un des canaux,

5°) changement d'objet sans déplacer la grille multiplicatrice,

6°) enregistrement d'un second hologramme à travers un second canal,

7°) et ainsi de suite à travers chacun des 9 canaux,

8°) développement de la plaque holographique.

Il est à noter que chaque hologramme peut être un hologramme multiple, et que chacun des hologrammes étant indépendant, on peut parfaitement déplacer la référence entre deux enregistrements.

AM.VII. PRESENTATION GENERALE ET MODE D'UTILISATION

Le dispositif réalisé est destiné à être utilisé dans un montage optique de filtrage utilisant 9 canaux répartis sur une matrice 3 x 3 et séparés les uns des autres de 8 mm. Il permet de positionner avec précision un groupe de 9 filtres choisi parmi une collection, de telle façon que chaque filtre soit centré sur chacun des canaux avec une précision de 0,06 mm. L'appareil est automatique et comprend deux unités : l'unité active, placée dans le montage optique, et l'unité de commande. Ces deux unités sont reliées par des cables de transmission de données et de puissance.

La figure AM.27 montre d'ensemble de l'appareil :

1°) unité de commande,

(x) son pas a est lié à λ et f par la relation $\frac{\lambda f}{a} = 8$ mm, afin que les ordres soient séparés de 8 mm.

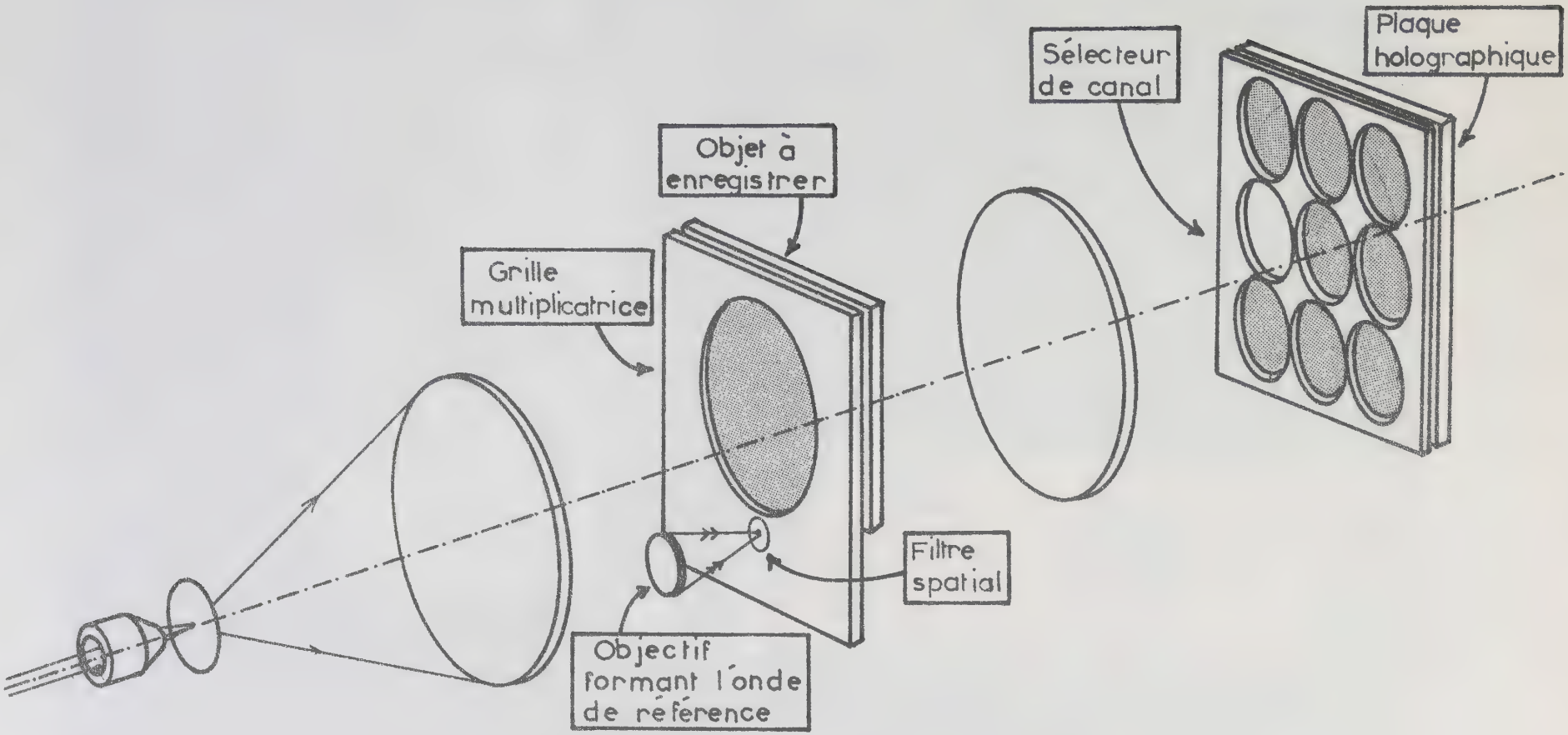


FIGURE AM 26 : Schéma du montage optique d'enregistrement des filtres-hologrammes.

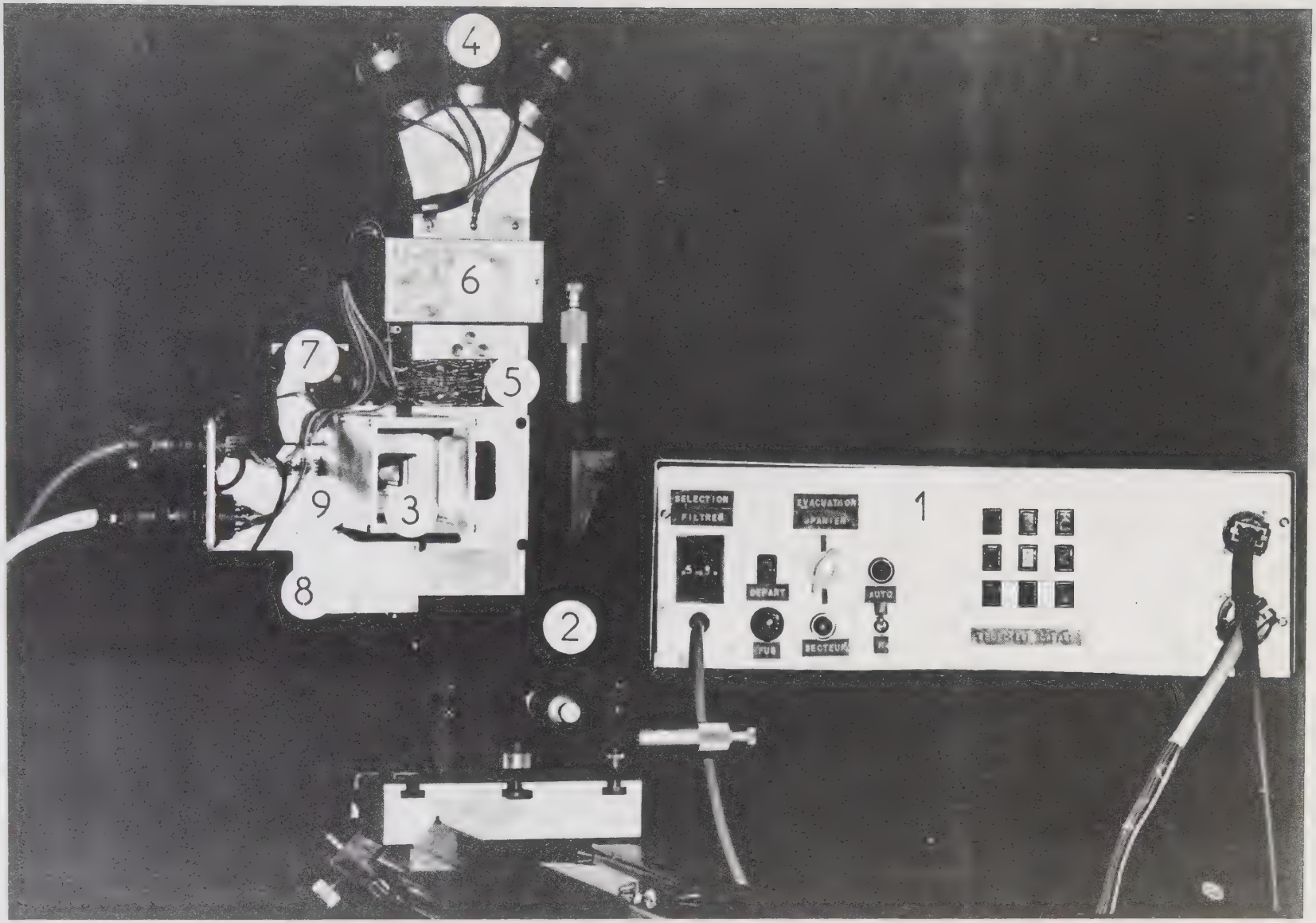


FIGURE AM 27 : Ensemble de l'appareil.

2°) platine micrométrique de positionnement de l'unité active,

3°) réserve de filtres,

4°) moteurs du sélecteur de canaux,

5°) capteurs du sélecteur de canaux,

6°) circuit de mise en forme et d'amplification des signaux des capteurs,

7°), 8°) moteurs du sélecteur de filtres,

9°) capteurs du sélecteur de filtres.

Les organes de l'unité de commande sont visibles sur la figure AM.22.

A - transformateur d'alimentation des moteurs (+ 3V et - 3V), des voyants et des relais,

B - transformateur de l'alimentation 5 V,

C - radiateur des diodes et des transistors-ballasts,

D - condensateurs de filtrage de l'alimentation des moteurs,

E - carte d'alimentations stabilisées (5V, 6V, 12V)

F - carte de puissance,

G - carte logique dans son blindage de cuivre.

Le mode d'utilisation de l' appareil est le suivant (se reporter à la figure AM.23) :

1°) mettre en place l'appareil dans le montage optique,

2°) s'assurer que le commutateur 5 est en position verticale, qu'il n'y a pas de filtre en place et que le panier est libéré,

3°) mettre les roues codeuses à 00 (1)

4°) mettre l'interrupteur général (6) en position M,

5°) sélectionner, à l'aide des roues codeuses, le numéro du filtre désiré en se référant à la fiche jointe à l'appareil,

6°) appuyer sur le bouton de départ (3) et aider le panier à s'engager en le poussant du doigt,

7°) attendre que le voyant (3) s'allume : le filtre est alors en place,

8°) sélectionner alors les canaux désirés en appuyant simplement sur les interrupteurs correspondants (clavier 8).

Pour changer de filtre, sélectionner un nouveau numéro et appuyer sur le bouton (3).

Pour centrer les canaux, utiliser le filtre 1, et faire coïncider les 9 points lumineux donnés par la grille multiplicatrice avec les 9 trous du filtre.

Avant d'arrêter l'appareil, extraire le panier en tournant le commutateur (5) d'1/2 tour dans le sens des aiguilles d'une montre (le voyant (7) est allumé quand le commutateur est vertical).

Si par erreur, un numéro supérieur à 30 est sélectionné, il est possible de réengager le panier soit par l'avant (remettre les roues à 00 avant), soit par l'arrière (les mettre à 31).

C H A P I T R E G M

APPLICATION DES GRILLES MULTIPLICATRICES AU FILTRAGE MULTICANAL

GM.I. INTRODUCTION

Afin d'obtenir les neuf spectres susceptibles d'être filtrés dans chacun des canaux du système étudié au chapitre AM, l'utilisation de grilles multiplicatrices semble être une solution simple et rationnelle. Cette méthode pose cependant le problème important de l'égalisation de l'intensité de chacun des ordres. J.L. TRIBILLON (GM.1), puis AEBISCHER, AGBANI (GM.2) ont déjà apporté nombre de solutions à ce problème.

Après avoir rappelé le principe de la multiplication des spectres à l'aide de grilles périodiques, nous nous sommes attachés au cas où ces dernières sont décrites par une fonction à variables séparables. Les cas des grilles de type créneau et sinusoïdal font l'objet de considérations plus poussées. Après avoir démontré qu'il n'existait pas de grilles multiplicatrices par 3 ayant un rendement de 100 %, nous avons appliqué les résultats à la réalisation de grilles en vue de leur utilisation avec le système multicanal étudié précédemment.

GM.II. PRINCIPE DE LA MULTIPLICATION A L'AIDE DE GRILLES PERIODIQUES

GM.II.1. Cas général

Une grille multiplicatrice est une répartition bidimensionnelle de transmittance, périodique selon deux directions. Elle est décrite par une fonction complexe $g(x,y) = a(x,y)\, e^{i\phi(x,y)}$ où a et ϕ sont des fonctions réelles.

Si les directions de périodicité sont Ox et Oy et que les périodes selon ces deux axes sont respectivement p_x et p_x, on peut écrire :

$$g(x,y) = \underline{///}\left(\frac{x}{p_x}, \frac{y}{p_y}\right) \otimes p(x,y) \quad \text{où}$$

- le signe $\otimes$ désigne l'opération de convolution(x)
- $\underline{///}$ désigne la distribution définie par

$$\underline{///}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}\right) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \delta\left(x - \frac{i}{a}\right) \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \delta\left(y - \frac{i}{b}\right)$$

- p(x,y) est défini par

$$p(x,y) = g(x,y) \quad (x,y) \in \mathcal{D}$$

$$p(x,y) = 0 \quad \forall (x,y) \notin \mathcal{D}$$

avec $\mathcal{D} = \left[-\frac{a}{2}, +\frac{a}{2}\right] \times \left[-\frac{b}{2}, +\frac{b}{2}\right]$

Si une telle grille est placée dans le plan objet d'un montage optique de filtrage (voir au chapitre FC), on obtient dans le plan du spectre la transformée de Fourier G(u,v) de g(x,y) à un facteur de phase près.

On a $G(u,v) = \frac{1}{p_x p_y} \underline{///}(p_x u, p_y v).P(u,v)$ où P(u,v) est la transformée de Fourier de p(x,y).

G(u,v) est donc un réseau de Pics de Dirac, dont l'amplitude est modulée par P(u,v).

La figure GM.1 représente un tel réseau dans le cas où $p_x = p_y$.

Si on superpose à cette grille un objet o(x,y), on effectue le produit des deux. Dans le plan conjugué on obtient donc le produit de convolution des transformées de Fourier $O(u,v) \otimes G(u,v)$: chacun des pics de G(u,v) est alors le centre d'un spectre de l'objet.

(x) Bien que la plupart des auteurs utilisent la notation inverse, , nous noterons le produit de corrélation et $\otimes$ le produit de convolution.

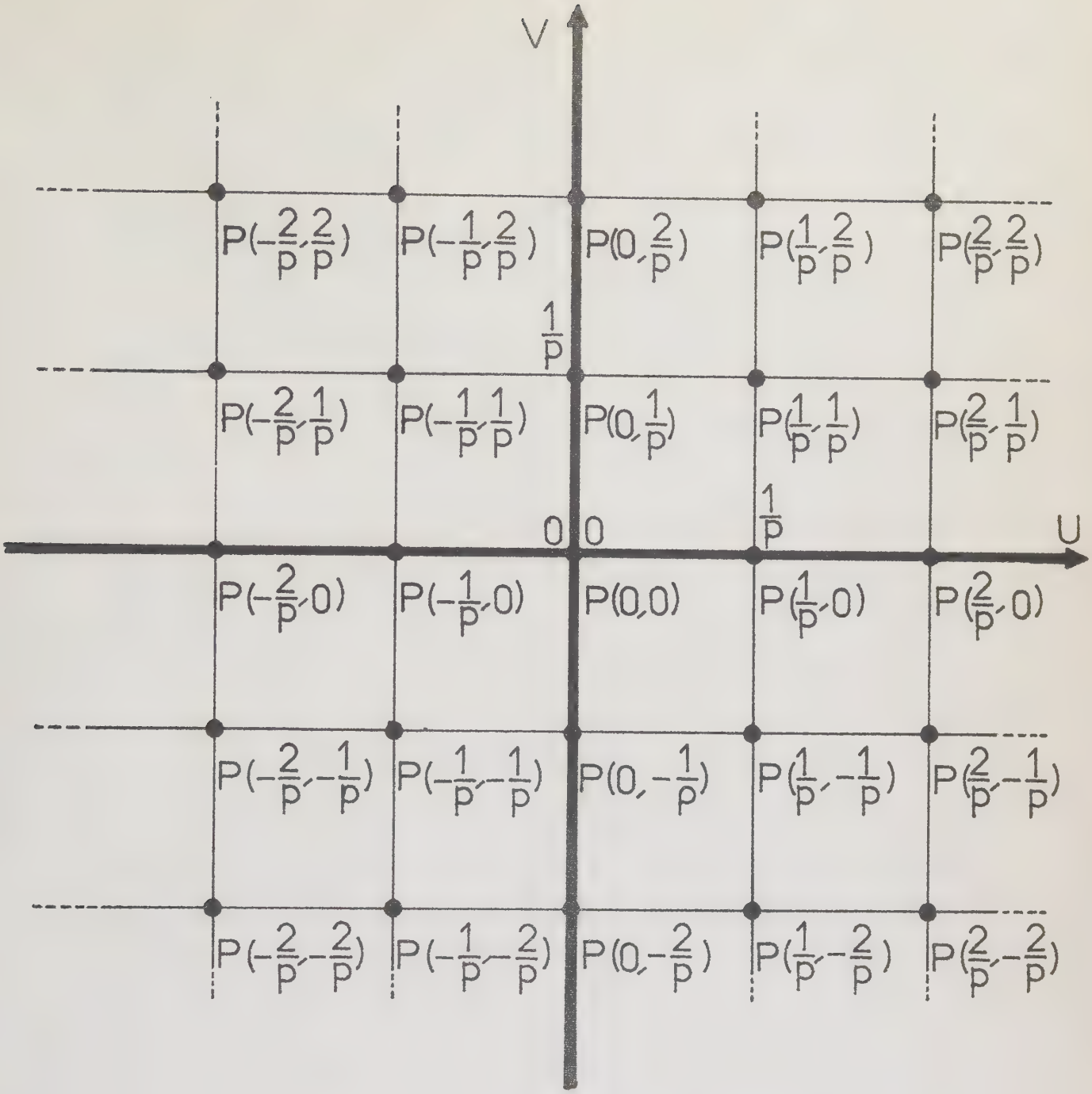


FIGURE GM 1 : Amplitude de G(u,v) dans le cas d'une grille non décomposable en produit de 2 grilles linéaires.

Dans le cas où ces spectres n'ont aucune partie commune, c'est à dire dans le cas où le théorème d'échantillonnage[(x)] est vérifié, on effectue une véritable multiplication de ces derniers. L'intensité de chacun est déterminée par l'amplitude du pic de G(u,v) correspondant.

GM.II.2. Cas où $g(x,y) = g_x(x) \cdot g_y(y)$

C'est le cas obtenu par superposition de deux grilles à une seule direction de périodicité. On a

$$g_x(x) = \underline{///}\left(\frac{x}{p_x}\right) \otimes p_x(x) \text{ d'où } G_x(u,v) = \frac{1}{p_x}\ \underline{///}\ (p_x u) P_x(u)\delta(v)$$

$G_x(u,v)$ est donc une répartition périodique selon l'axe O'u de pics de Dirac d'amplitude modulée par $P_x(u)$. Dans la suite on désignera par a_n l'amplitude du terme d'ordre n, le terme central étant a_0.

$G_y(u,v)$ est une répartition analogue selon l'axe O'v.

On a $G(u,v) = G_x(u,v) \otimes G_y(u,v)$

Dans le cas où $p_x = p_y = p$, on obtient pour G(u,v) un réseau de points tel que celui représenté sur la figure GM.2. Dans ce cas, comme dans le cas précédent, la superposition d'un objet à la grille se traduit par une multiplication des spectres, si le théorème d'échantillonnage est respecté.

GM.III PROBLEME DE L'EGALISATION DES TERMES

GM.III.1. Position du problème

L'appareil multicanal réalisé fait appel à 9 spectres de l'objet, répartis selon une matrice 3x3. Pour des raisons de commodité, on

[(x)] Cas particulier du théorème de Shannon qui s'énonce comme suit: toute fonction à spectre limité par f_{max} peut être intégralement connue à partir d'un échantillonnage périodique de fréquence inférieure à $f_{max}/2$.

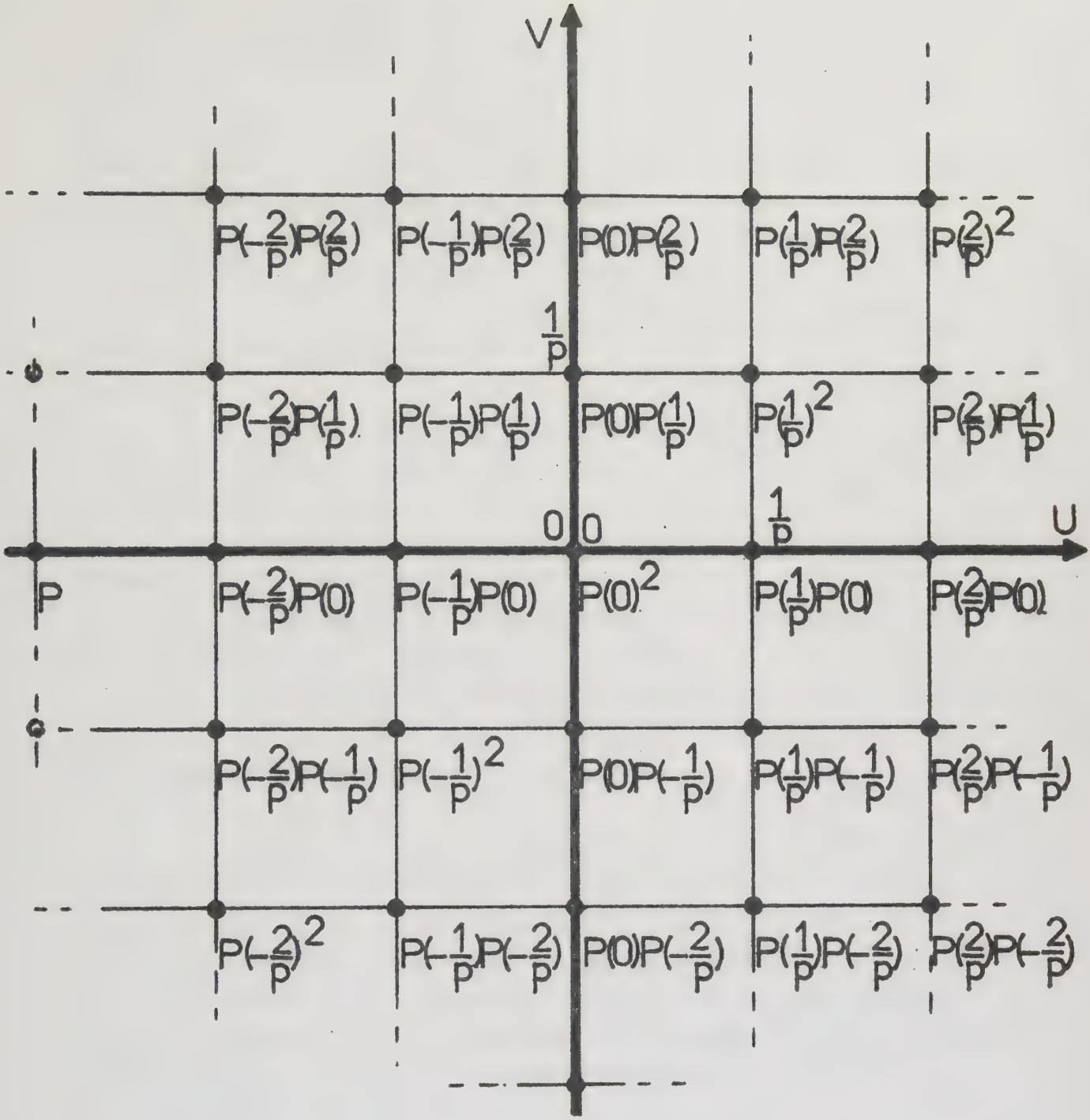


FIGURE GM 2 : Amplitude de G(u,v) dans le cas d'une grille décomposable en produit de 2 grilles linéaires identiques croisées à 90°.

souhaite que leur intensité lumineuse soit la même. Une solution consisterait à utiliser une grille périodique quelconque et à intercaler des densités telles que les intensités transmises soient identiques. Cette solution entraîne une diminution considérable du rendement, défini comme le rapport de l'intensité transmise dans les neuf termes centraux et de l'intensité totale arrivant sur l'objet. Comme nous l'avons vu précédemment, une grille multiplicatrice x 9 s'obtient facilement par simple superposition de deux grilles multiplicatrices x 3 croisées. Dans la suite de ce chapitre, nous ne nous intéresserons donc qu'au cas de grilles multiplicatrices x 3.

D'autre part, afin d'obtenir un rendement maximal, nous ne nous attacherons qu'au cas des grilles de phase pure, c'est à dire dont la transparence[(x)] T (x,y) est égale à 1.

La variation de phase permettant l'obtention de telles grilles peut être obtenue de différentes manières :

- par variation de l'épaisseur d'un matériau d'indice constant ; c'est le cas des grilles réalisées sur photorésist,
- par variation de l'indice d'un matériau d'épaisseur constante,
- par variation simultanée de ces deux grandeurs; c'est le cas des émulsions photographiques blanchies.

Dans tous les cas, la transmittance de la grille, définie comme le rapport de l'amplitude complexe de l'onde transmise à celle de l'onde incidente, peut s'écrire $g(x,y) = e^{i\phi(x)}$. Il a d'autre part été démontré (GM.3) que dans le cas de grilles réalisées dans un matériau d'indice constant et dont l'épaisseur variait selon une fonction sinusoïdale, triangulaire ou rectangulaire, il est possible d'obtenir l'égalisation des trois termes centraux. Les rendements ainsi obtenues sont alors respectivement égaux à 0,9, 0,86 et 0,85.

[(x)] la transmittance étant définie comme un rapport d'amplitude complexe $t(x,y) = a(x,y) \exp\left(j\phi(x,y)\right)$, la transparence en est le carré du module $T(x,y) = |t(x,y)|^2 = t(x,y) \times t^*(x,y) = a(x,y)e^{j\phi(x,y)}\, a(x,y)e^{-j\phi(x,y)}$

Les grilles considérées sont supposées réalisées dans un matériau parfaitement transparent, d'indice de réfraction n pour la longueur d'onde λ utilisée. Leur épaisseur e(x,y) n'est fonction que de x, donc e(x,y) = e(x).

Supposons la grille éclairée par une onde plane uniforme $\sum_i = A e^{j\phi_i}$.

L'onde transmise est $\sum_t = A e^{j\phi_t(x)}$

On peut considérer que les rayons se propagent rectilignement à travers la grille, d'où :

$\phi_t(x) = \phi_i - \frac{2\pi(n-1)e(x)}{\lambda} - \phi$ où ϕ est une constante. Afin de ne pas trop compliquer les calculs, on peut ne conserver que :

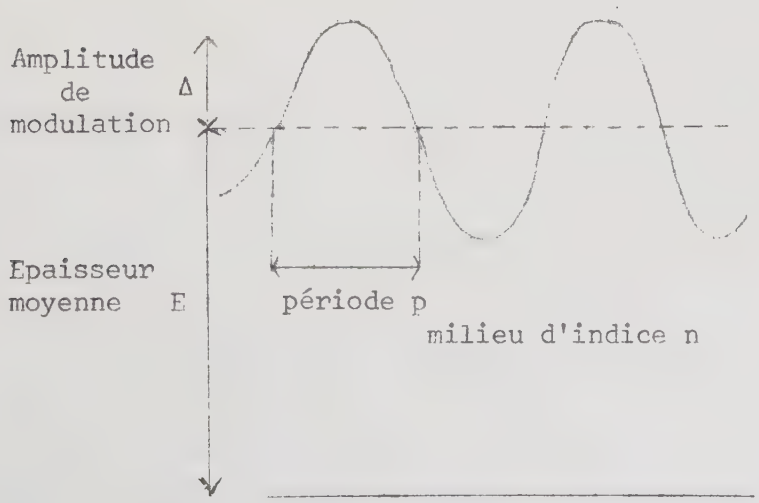
$\phi_t(x) = - \frac{2\pi(n-1)e(x)}{\lambda}$, ce qui donne $\sum_t = A e^{\frac{-2j\pi(n-1)e(x)}{\lambda}}$

d'où $g(x,y) = e^{\frac{-2j\pi(n-1)e(x)}{\lambda}}$

Nous allons étudier deux cas particuliers, où e(x) est une fonction sinusoïdale, puis rectangulaire.

GM.III.2. Cas des grilles à profil sinusoïdal

C'est le cas où $e(x) = E + \Delta \sin \frac{2\pi x}{p}$, représenté ci-dessous :



On a alors, à une constante près :

$$g(x,y) = e^{j\left[\frac{2\pi(n-1)\Delta}{\lambda} \sin \frac{2\pi x}{p}\right]} = e^{2j\alpha \sin(\frac{2\pi x}{p})} \quad \text{en posant } \alpha = \frac{\pi(n-1)\Delta}{\lambda} .$$

En appliquant la relation du paragraphe GM.II.2 et la définition de la transmission de Fourier,

$$G(u,v) = \frac{1}{p} \; \underline{///} \; (pu) \; \delta(v) \int_{-p/2}^{+p/2} e^{2j\alpha \sin \frac{2\pi x}{p}} \, e^{-2j\pi ux} \, dx$$

qui peut aussi s'écrire :

$$G(u,v) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(u - \frac{n}{p})\delta(v) \; a_n \quad \text{avec } a_n = \frac{1}{p} \int_{-p/2}^{+p/2} e^{2j(\alpha \sin \frac{2\pi x}{p} - \frac{\pi n x}{p})} \, dx.$$

Ainsi, a_{-1}, a_0 et a_1 représentent les amplitudes des trois termes centraux diffractés par la grille.

Si on pose $\theta = -\frac{2\pi x}{p}$ il vient $dx = \frac{-p}{2\pi} d\theta$.

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j(n\theta - 2\alpha \sin\theta)} d\theta.$$

On reconnaît là l'expression des fonctions de Bessel de première espèce (GM.4 p. 13) = $a_n = J_n(2\alpha)$.

L'amplitude du terme d'ordre n du spectre de la grille est donc donnée par la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre n. On voit sur la figure GM.3, la méthode graphique permettant de déterminer les amplitudes de chacun des termes pour une valeur déterminée de l'amplitude de modulation $\Delta(\Delta = \frac{\alpha \lambda}{\pi(n-1)})$. Il suffit de couper l'ensemble des courbes $J_n(2\alpha)$ par une droite α = cste pour obtenir les valeurs de chacun des termes. D'autre part, J_n et J_{-n} sont liées par la relation $J_{-n} = (-1)^n J_n$ (GM.4. p.6). Dans l'exemple de la figure GM.3, pour $\alpha = \pi/6$, les amplitudes calculées sont donc :

$$\begin{cases} a_0 = -0{,}75 \text{ (le signe - correspond à un déphasage de } \pi) \\ a_1 = -a_{-1} = 0{,}45 \\ a_2 = a_{-2} = 0{,}12 \\ a_3 = -a_{-3} = +\,0{,}02 \\ a_n \simeq a_{-n} \simeq 0 \text{ pour tout } n>3 \end{cases}$$

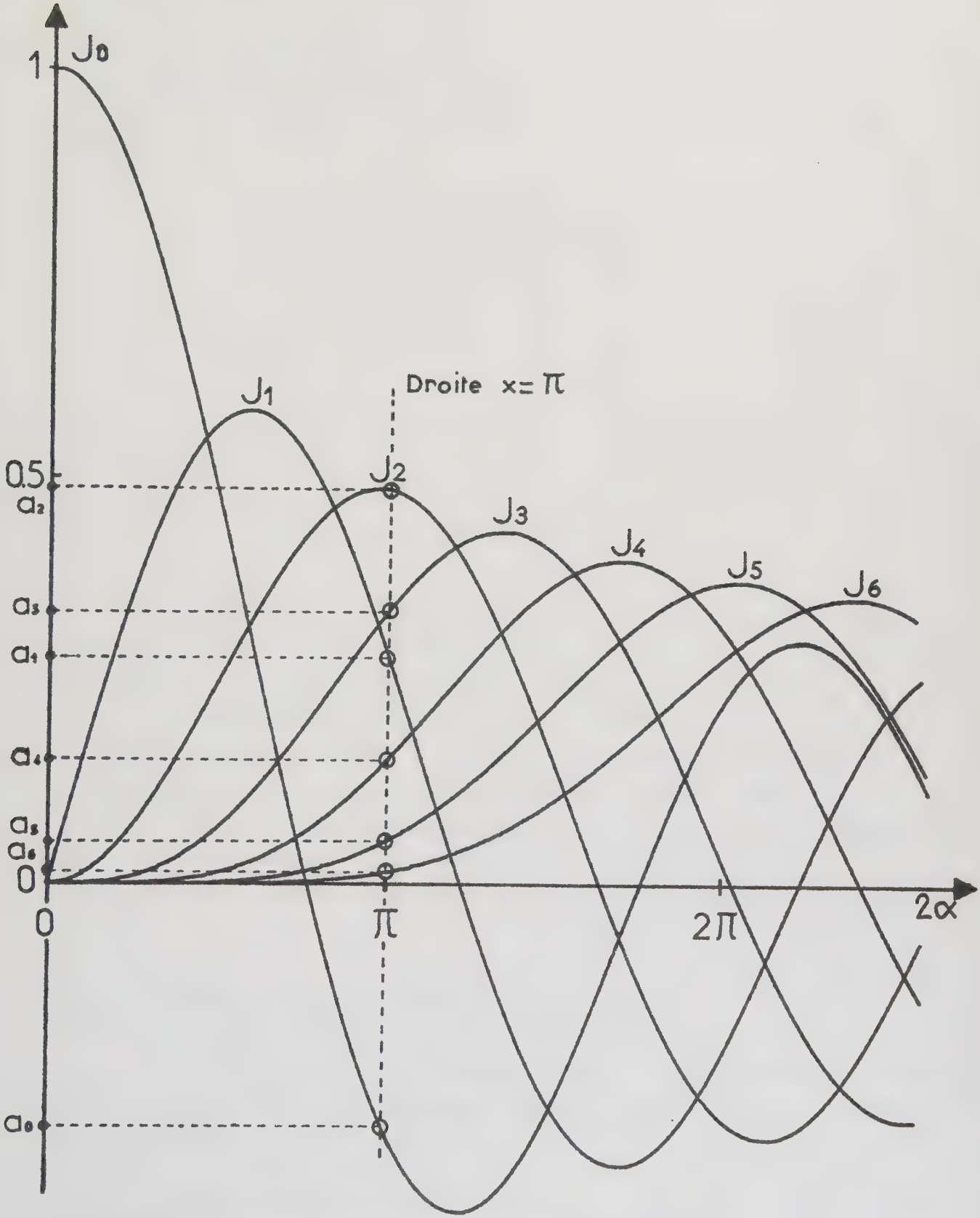


FIGURE GM 3 : Détermination graphique de l'amplitude des 7 premiers ordres diffractés par une grille de phase à profil sinusoïdal.

Notre problème étant l'égalisation des intensités des trois termes centraux, les solutions sont données par les intersections des courbes J_0^2 et J_1^2. Comme on le voit sur la figure GM.4, il existe une infinité de solutions, dont l'intensité tend vers 0 quand la modulation Δ augmente. Le tableau suivant donne les valeurs de 2α pour lesquelles l'égalisation est réalisée, les intensités et les rendements correspondants.

2α	$a_0^2=a_1^2=a_{-1}^2$	rendement
1,43	0,306	89 %
3,06	0,089	27 %
4,68	0,078	23 %
6,26	0,048	14 %
7,81	0,043	13 %
9,42	0,032	10 %
tend vers $k\pi/2$	tend vers 0	tend vers 0

La première solution est la plus intéressante puisque le rendement obtenu est voisin de 90 %, ce qui donne un rendement de 81 % lorsqu'on croise deux grilles de ce type pour obtenir 9 spectres d'égale intensité.

L'inconvénient est qu'il est très difficile d'obtenir des grilles de phase à profil sinusoïdal, à cause de la non-linéarité des récepteurs. photographiques. Par contre, il est relativement aisé de réaliser des grilles à profil de type créneau par simple photographie puis blanchiment(x), du moins dans le cas de fréquences spatiales faibles (jusqu'à 100 mm^{-1}). C'est pourquoi nous avons consacré un paragraphe particulier à ce type de grilles.

GM.III.3. Cas des grilles à profil de type créneau

Il a été montré par L.P.BOIVIN (GM.3) que l'égalisation des trois termes centraux était possible dans le cas de ce type de grilles, lorsque le

(x) voir l'annexe consacrée aux techniques de blanchiment.

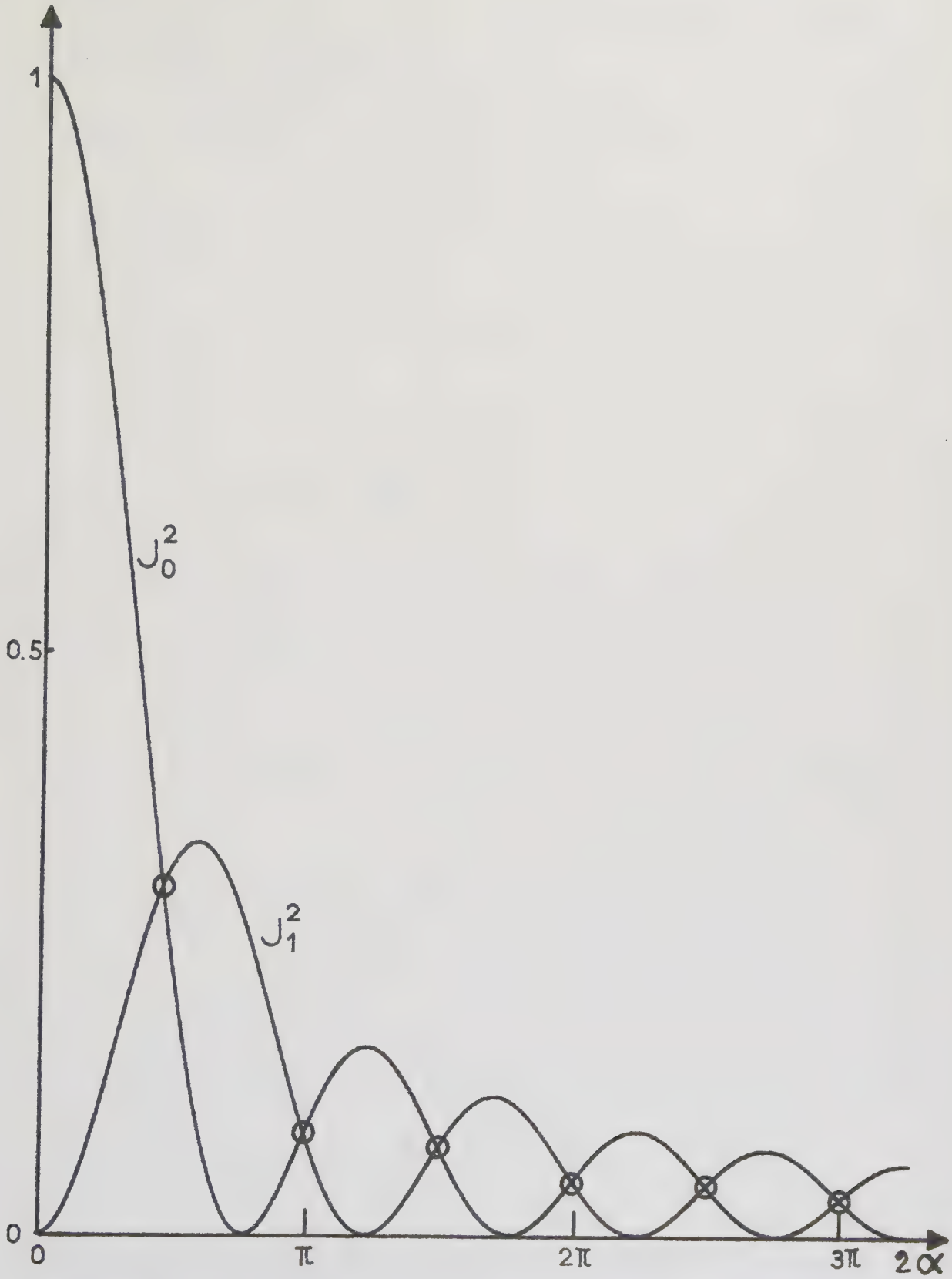


FIGURE GM 4 : Détermination graphique des valeurs de α pour lesquelles les 3 ordres centraux sont d'égales intensités.

rapport cyclique c était de 0,5[(x)]. Le rendement maximal obtenu est alors de 86 %. Nous nous sommes demandés si ce rendement ne pouvait pas être augmenté par modification de c.

Dans ce cas, la grille est décrite par la fonction suivante :
$g(x,y) = t(x) = \underline{///}\left(\frac{x}{p}\right) \otimes p(x)$ où $p(x)$ est défini par :

$$\begin{cases} p(x) = 0 \quad \forall x \notin \mathcal{D}_1 \cup \mathcal{D}_2 \\ p(x) = e^{0} = \forall x \in \mathcal{D}_1 \\ p(x) = e^{2j\alpha} = e^{\frac{2j\pi(n-1)\Delta}{\lambda}} \quad \forall x \in \mathcal{D}_2 \\ \mathcal{D}_1 = \left[-\frac{p}{2}, -\frac{cp}{2}\right] \cup \left[+\frac{cp}{2}, +\frac{p}{2}\right] \\ \mathcal{D}_2 = \left[-\frac{cp}{2}, +\frac{cp}{2}\right] \end{cases}$$

La transformée de Fourier de $g(x,y)$ est alors :

$$G(u,v) = \frac{1}{p}\ \underline{///}\ (pu)\ \delta(v)\quad P(u) \text{ avec } P(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(x)\, e^{-2j\pi ux}\, dx$$

En remplaçant $p(x)$ par son expression, on obtient :

$$P(u) = \int_{-\frac{p}{2}}^{-\frac{cp}{2}} e^{-2j\pi ux}\, dx + \int_{+\frac{cp}{2}}^{\frac{p}{2}} e^{-2j\pi ux}\, dx + e^{2j\alpha} \int_{-\frac{cp}{2}}^{+\frac{cp}{2}} e^{-2j\pi ux}\, dx$$

soit $\boxed{P(u) = \frac{1}{\pi u}\left[(e^{2j\alpha} - 1)\sin(\pi ucp) + \sin(\pi up)\right]}$

On obtient alors :

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{p} P(0) = 1 + (e^{2j\alpha} - 1)\, c \\ a_1 = \frac{1}{p} P\left(\frac{1}{p}\right) = \frac{1}{\pi}\left[(e^{2j\alpha} - 1)\sin(c\pi)\right] \\ a_{-1} = \frac{1}{p} P\left(-\frac{1}{p}\right) = a_1 \end{cases}$$

(x) On appelle rapport cyclique d'une fonction créneau le rapport de sa partie non nulle l sur la période p. Ce rapport c varie de 0 (cas de la fonction nulle) à 1 (cas de la fonction unité).

d'où on tire les intensités

$$\begin{cases} |a_o|^2 = 1 + 2c(1-c)(\cos 2\alpha - 1) \\ |a_1|^2 = 2\,\dfrac{\sin^2(c\pi)}{\pi^2}\,(1 - \cos 2\alpha) \\ |a_{-1}|^2 = |a_1|^2 \end{cases}$$

L'égalisation des trois termes centraux a donc lieu lorsque l'égalité suivante est vérifiée :

$$1 + 2c(1-c)(\cos 2\alpha - 1) = 2\,\frac{\sin^2(c\pi)}{\pi^2}\,(1 - \cos 2\alpha)$$

d'où une expression de cos 2α :

$$\cos 2\alpha = 1 - \frac{1}{2\left(\dfrac{\sin^2(c\pi)}{\pi^2} + c - c^2\right)}$$

En remplaçant cos 2α par son expression dans celle de $|a_1|^2$, il vient :

$$|a_1|^2 = \frac{1}{1 + \dfrac{\pi^2(c-c^2)}{\sin^2(c\pi)}}$$

Le rendement énergétique dans les trois ordres centraux est donc égal à 3 $|a_1|^2$. La figure GM.5 représente la variation de ce rendement en fonction du rapport cyclique c. Il passe par un maximum égal à 86,5 % pour c = 0,5.

C'est donc lorsque leur rapport cyclique est égal à 0,5 que les mires de type créneau présentent un rendement maximum lors de l'égalisation des trois termes centraux.

GM.III.4. Recherche de la solution maximale

La grille multiplicatrice idéale serait celle qui aurait un rendement de 100 % dans les trois termes centraux. Ce serait donc évidemment une grille de phase pure. On se propose de déterminer si elle existe, en opérant par transformation de Fourier inverse.

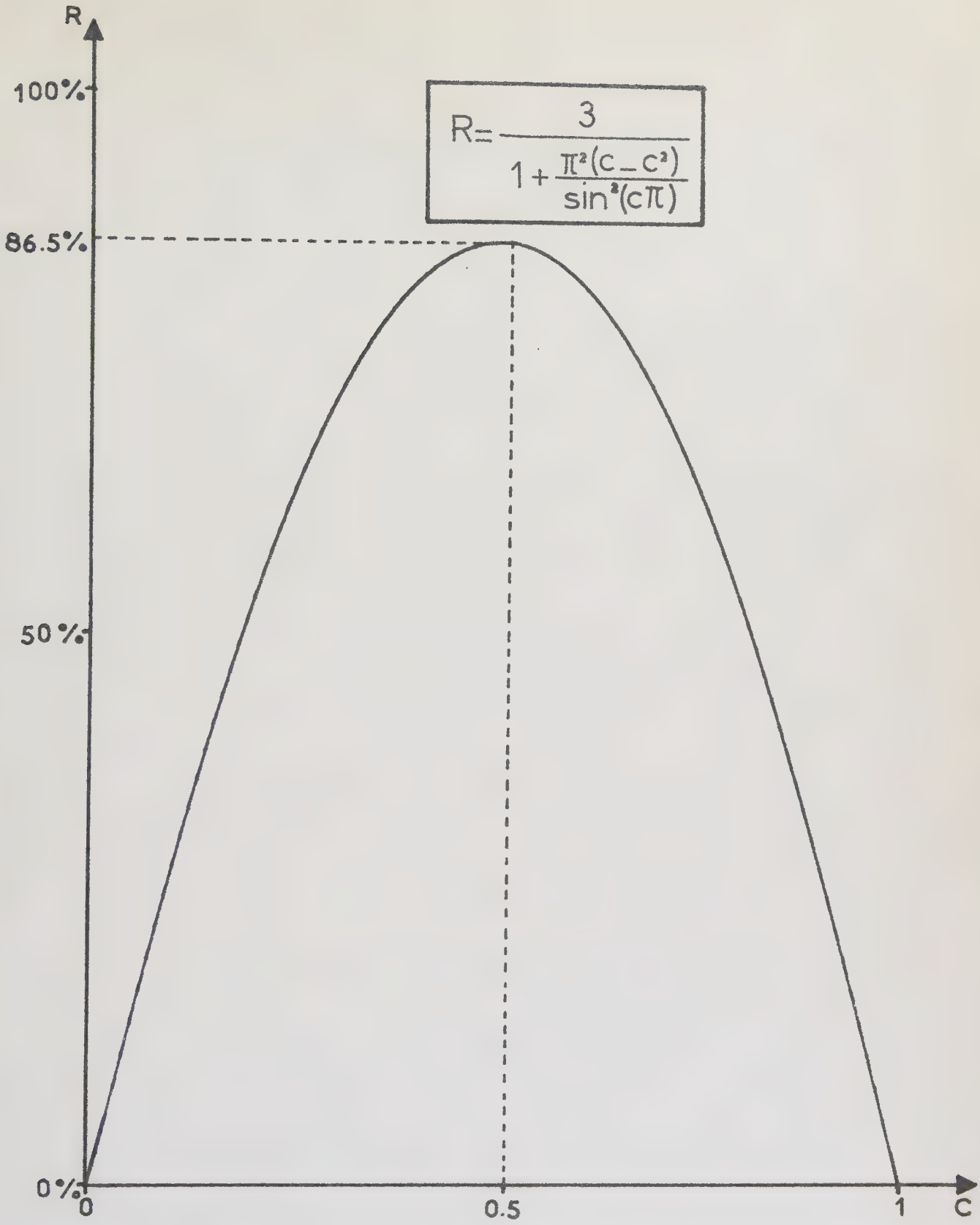


FIGURE GM 5 : Variation du rendement énergétique diffracté dans les 3 termes centraux en fonction du rapport cyclique d'une grille de phase à profil de type créneau.

On aurait alors $|a_o|^2 = |a_1|^2 = |a_{-1}|^2 = 1/3$ et $a_i = 0 \ \forall i \notin \{-1,0,+1\}$.

Si on fixe arbitrairement la phase de a_o à 0, on peut écrire :

$$\begin{cases} a_o = \sqrt{\frac{1}{3}} \\ a_1 = \sqrt{\frac{1}{3}}\, e^{i\alpha} \\ a_{-1} = \sqrt{\frac{1}{3}}\, e^{i\beta} \end{cases}$$

où α et β sont les seules inconnues du probleme.

d'où $G(u,v) = \sqrt{\frac{1}{3}} \left[\delta(u-\frac{1}{p})e^{i\alpha} + \delta(u) + \delta(u+\frac{1}{p})\, e^{i\beta}\right] . \ \delta(v)$

La fonction qui décrit la transmittance de la grille recherchée est donnée par la transformation de Fourier inverse. Elle est égale à

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} G\,(u,o)\, e^{+2i\pi ux}\, du = \sqrt{\frac{1}{3}} \left[e^{+i(\alpha + \frac{2\pi x}{p})} + e^{i(\beta - \frac{2\pi x}{p})} + 1 \right]$$

soit $g(x,y) = \sqrt{\frac{1}{3}} \left[1 + \cos A + \cos B + i(\sin A + \sin B)\right]$ avec $\begin{cases} A = \alpha + \frac{2\pi x}{p} \\ B = \beta - \frac{2\pi x}{p} \end{cases}$

La condition pour que $g(x,y)$ soit une grille de phase est que $|g(x,y)| = 1 \ \forall (x,y)$. Appliquons cette condition à l'expression de $g(x,y)$

$$|g(x,y)|^2 = \frac{1}{3} \left[1 + \cos^2 A + \cos^2 B + 2\cos A + 2\cos B + 2\cos A \cos B + \sin^2 A + \sin^2 B + 2\sin A \sin B\right]$$

$$= \frac{1}{3} \left[3 + 2\cos A + 2\cos B + 2\cos A \cos B + 2\sin A \sin B\right]$$

$$|g(x,y)|^2 = 1 \Rightarrow \cos A + \cos B + \cos(A - B) = 0 \ \forall x$$

En remplaçant A et B par leurs expressions, il vient :

$$\cos(\alpha + \frac{2\pi}{p} x) + \cos(\beta \ \frac{2\pi}{p} x) + \cos(\alpha - \beta + \frac{4\pi}{p} x) = 0 \ \forall x$$

En posant $x = 0$ et $x = \frac{p}{2}$, on obtient deux équations :

$$\begin{cases} \cos\alpha + \cos\beta + \cos(\alpha - \beta) = 0 \\ -\cos\alpha - \cos\beta + \cos(\alpha - \beta) = 0 \end{cases}$$

En effectuant la somme et la différence de ces deux équations, on obtient :

$\cos(\alpha - \beta) = 0$ et $\cos\alpha + \cos\beta = 0$.

On doit donc avoir simultanément :

$\alpha - \beta = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$ et $\alpha \pm \beta = (2k + 1)$ où k est un entier.

Il n'existe pas de valeur de k entière telle que ces deux égalités soient vérifiées.

Il n'existe donc pas de grille multiplicatrice telle que le rendement soit de 100 % dans les trois termes centraux.

Nous avons ensuite abordé la recherche de la solution maximale, mais la complexité du problème est sans rapport avec le gain probable, puisqu'il a été montré qu'un rendement de 86 % était facile à obtenir avec des grilles de type créneau. Nous avons donc arrêté là les recherches théoriques sur les grilles périodiques, pour aborder leur réalisation en vue des applications envisagées.

GM.IV REALISATION DE GRILLES MULTIPLICATRICES EN VUE DE LEUR UTILISATION DANS L'APPAREIL MULTICANAL

GM.IV.1. Méthode systématique

Le type de grilles que nous avons choisi de réaliser est le type à profil créneau de rapport cyclique 0,5. L'amplitude de la modulation de phase de ce type de grille doit être égale à 2,008 radians. Cette valeur correspond à des variations d'épaisseur de l'ordre de λ. Ces variations s'obtiennent facilement avec des gélatines photographiques blanchies. (cf.Ann.II)D'autre part, ce procédé permet la réalisation de grilles de bonne qualité jusqu'à environ 100 mm^{-1}. Il est donc aisé de réaliser des grilles multiplicatrices donnant trois termes égaux par simple photoréduction de mires puis blanchiment. Cependant, pour effectuer la superposition de deux de ces grilles croisées afin d'obtenir neut termes centraux égaux, plusieurs méthodes de réalisation sont envisageables :

1°) réalisation de deux grilles identiques puis superposition,

2°) enregistrement successifs de deux grilles croisées, sur le même support photographique.

La seconde solution pose un problème dû à la non-linéarité de l'enregistrement. En effet, pour une émulsion photographique donnée développée puis blanchie selon un procédé donné, la courbe représentant la variation de phase obtenue en fonction de la lumination, est du type de celle de la figure GM.6.a. En enregistrant une mire créneau dont la transparence est représentée sur la figure GM.6.b, on obtient une grille de phase à deux niveaux. L'enregistrement successif sur le même support de deux mires décalées en rotation de 90°, avec les mêmes temps d'exposition, permet d'obtenir trois niveaux de phase 0, $\Delta\phi_1$ et $\Delta\phi_2$ correspondant aux luminations 0, E_{to} et 2 E_{to}. Or les trois niveaux de phase que l'on souhaite avoir sont 0, 2,008 et 4,016 (radians); Afin d'obtenir ce résultat, il suffit de déterminer graphiquement comme sur la figure GM.6.c quels sont les temps d'exposition t_1 et t_2.

La méthode de réalisation des grilles est donc la suivante :

1°) tracé de la courbe caractéristique (émulsion + traitement),

2°) détermination graphique des temps d'exposition t_1 et t_2 pour la longueur d'onde d'utilisation,

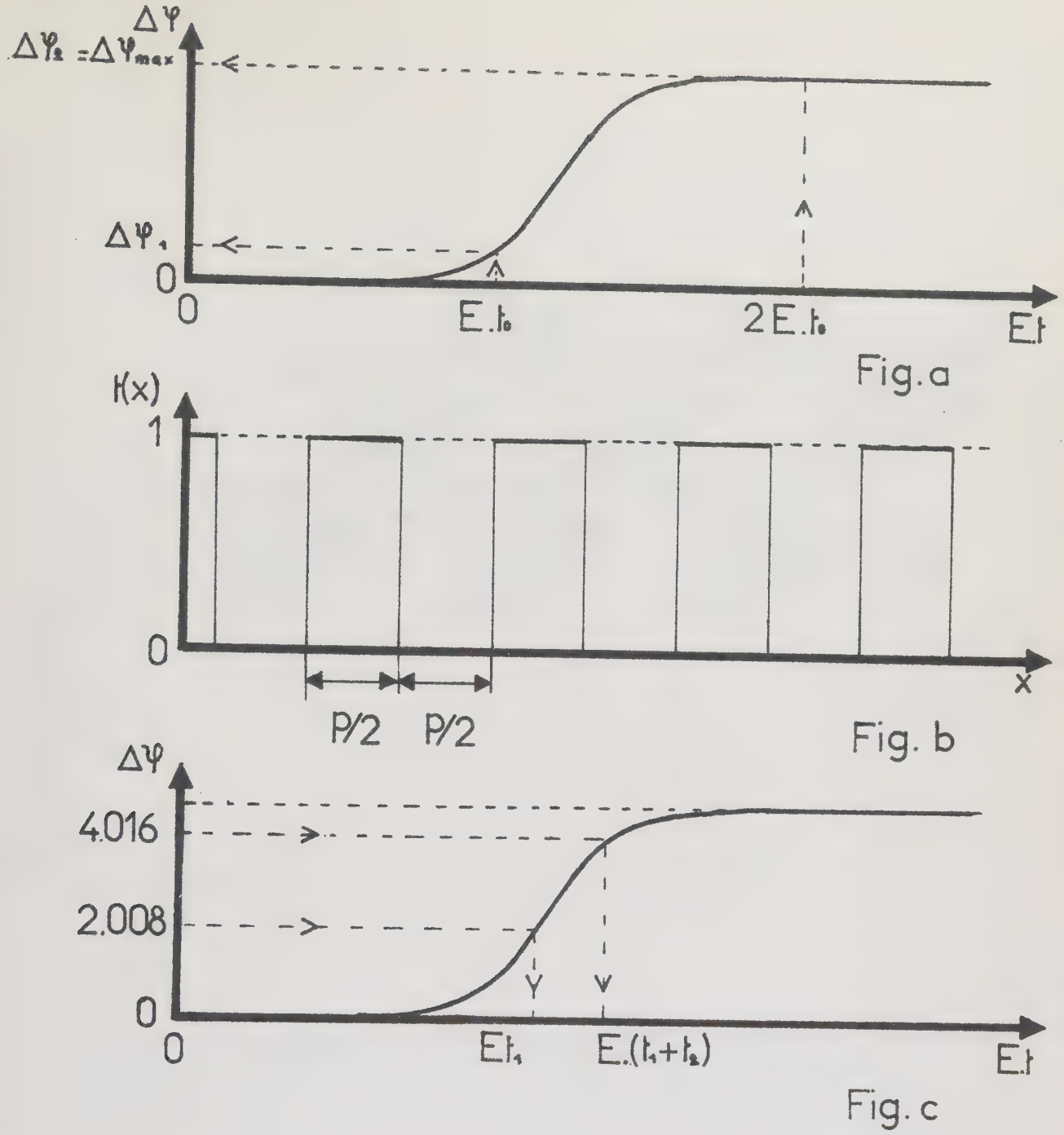
3°) enregistrement, développement puis blanchiment.

Le profil obtenu par cette méthode est schématisé sur la figure GM.7

Afin que les opérations de filtrage soient effectuées dans les meilleures conditions, nous avons réalisé une série de grilles ayant des pas et des amplitudes divers.

En effet, les différents termes doivent être séparés de 8 mm, aussi, selon la longueur d'onde et des éléments optiques utilisés, le pas des grilles devra être adapté.

Dans le cas des montages optiques de type "4f", le spectre est localisé au foyer de l'objectif et la relation qui lie les fréquences spatiales (u,v) aux variables d'espace (x',y') dans le plan de Fourier dépend de la distance focale de l'objectif et de la longueur d'onde utilisée ($x' = \lambda f u$, $y' = \lambda f v$). Ainsi, afin que les termes soient distants de 8mm,le pas p de la grille multiplicatrice à utiliser est lié à f et λ par la relation : $p = \frac{\lambda f}{8}$ (en mm).



FIGURES GM 6 : a - Variation du déphasage obtenu avec une émulsion photographique blanchie pour une longueur d'onde λ.

b - Transparence d'une mire créneau de pas p et de rapport cyclique c = 0,5.

c - Détermination des temps d'exposition t_1 et t_2 à l'aide de la fonction caractéristique de l'émulsion blanchie.

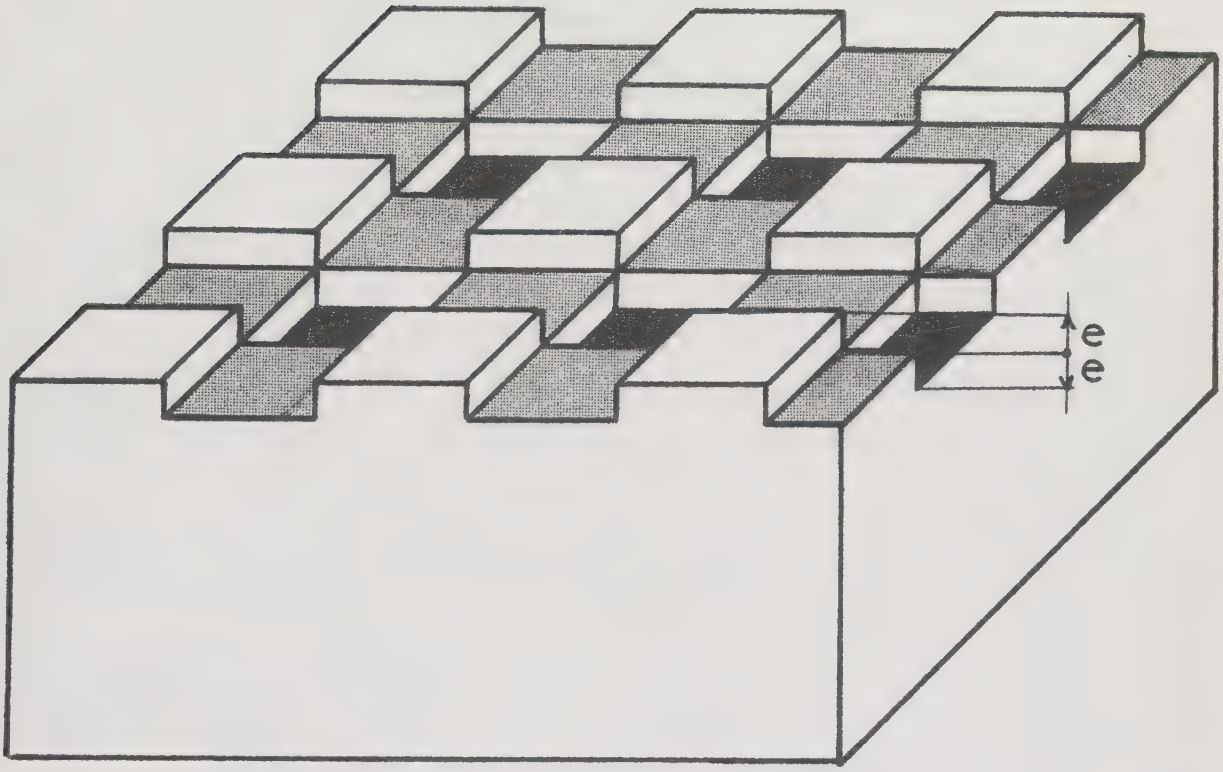


FIGURE GM 7 : Profil à 3 niveaux d'une grille de phase obtenue par photographie sur un même film d'une mire créneau sous 2 orientations décalées de 90°. Afin d'obtenir l'égalisation des 9 temes centraux diffractés par une telle grille, il faut que $e = \frac{2{,}008\ \lambda}{2\pi(n-1)}$.

D'autre part, les temps d'exposition t_1 et t_2 dépendent de la longueur d'onde à utiliser. Ils sont donnés par la courbe caractéristique de l'émulsion, où le changement de longueur d'onde correspond à un changement proportionnel d'échelle de l'axe des ordonnées.

Chaque grille multiplicatrice correspond donc à une longueur d'onde et une distance focale déterminée.

Ainsi, la grille à utiliser avec un objectif de 500 mm de focale et un laser He Ne, doit avoir 25,28 traits/mm.

Les grilles réalisées de cette façon sur microfilm et film holographique 10 E 75 nous ont donné entière satisfaction. Toutefois, le rendement obtenu dans les neuf termes centraux ne dépassait pas 0,65 alors que le rendement théorique était de $0{,}865^2 = 0{,}74$. Nous expliquons cela par le fait que les procédés chimiques de blanchiment utilisés laissent subsister un voile jaunâtre dans la gélatine.

On peut voir sur la figure GM.8 la réponse impulsionnelle d'une grille réalisée de cette façon, et sur la figure GM.9 le résultat de la multiplication du spectre d'une photographie aérienne.

GM.IV.2. Méthode empirique

Lorsque la fréquence spatiale des grilles devient trop importante, le procédé de réalisation précédent ne convient plus. En effet, la courbe caractéristique utilisée n'est valable que pour des fréquences relativement faibles, jusqu'à environ 25 mm^{-1}. Au delà le profil rectangulaire est fortement déformé, et les résultats expérimentaux ne concordent plus avec les prévisions théoriques. Aussi, une méthode purement expérimentale est elle nécessaire. Elle consiste à déterminer les temps d'exposition t_1 et t_2 à l'aide d'essais préalables, dans des conditions strictement connues. La méthode utilisée est décrite ci-après .

Comme dans la méthode précédente, on procède par photographie d'une mire binaire de grand format.

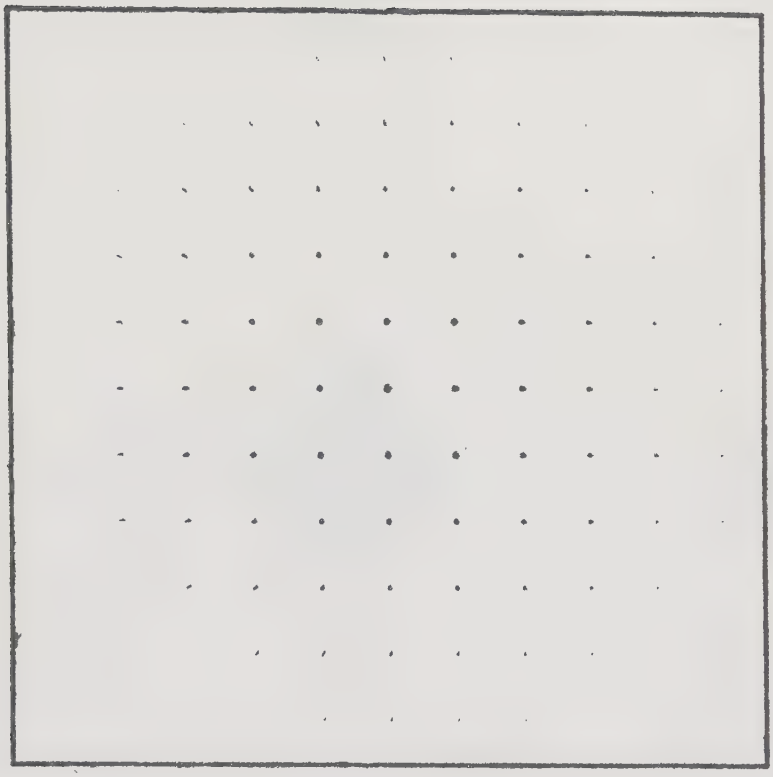


FIGURE GM 8 : Réponse impulsionnelle d'une des grilles multiplicatrices réalisées en vue de leur utilisation sur l'appareil multicanal.

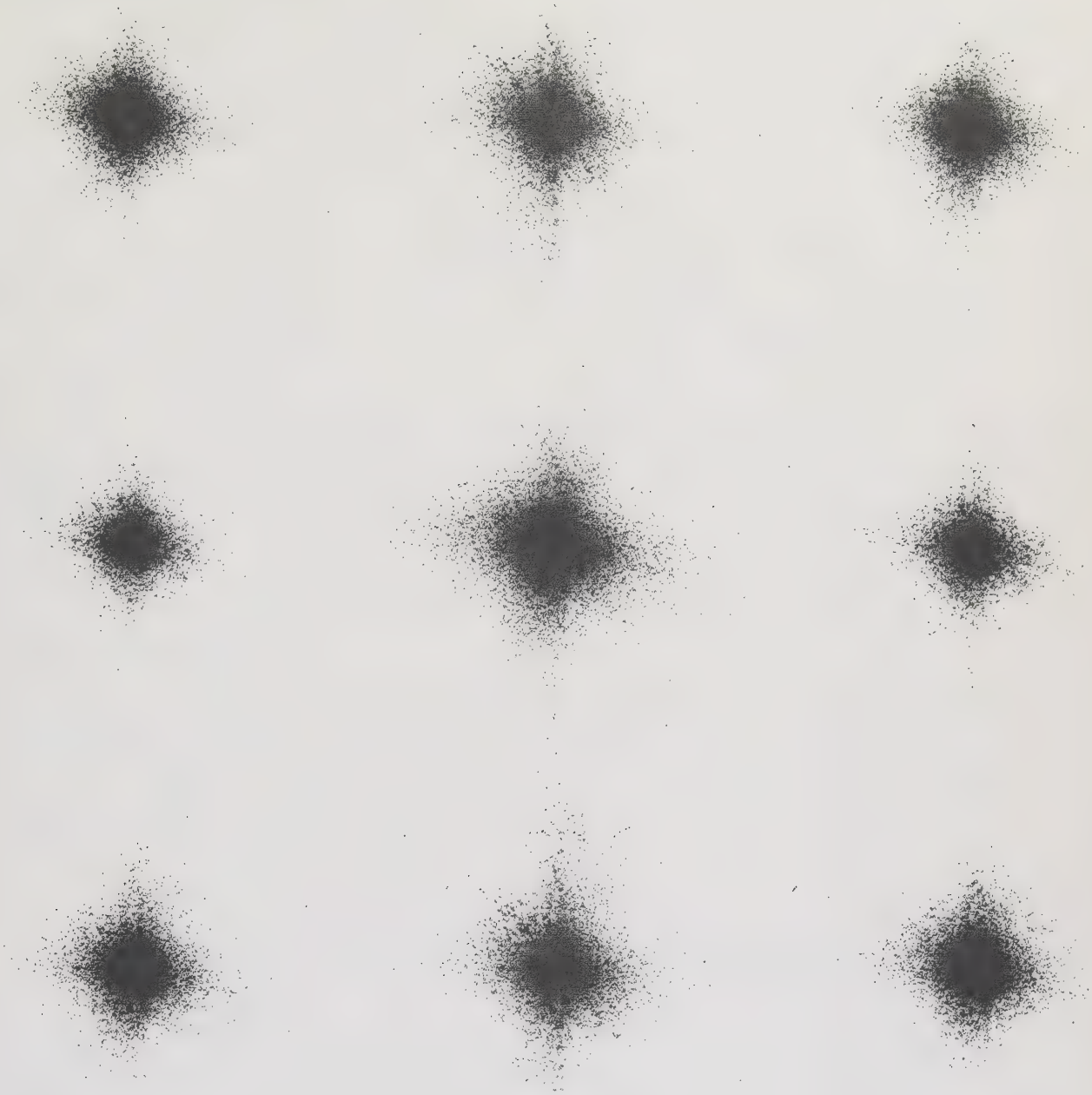


FIGURE GM 9 : Application de la grille multiplicatrice de la figure 8 à la multiplication du spectre d'une photographie aérienne.

1°) réglage du rapport de grandissement de façon que l'image enregistrée ait le pas souhaité,

2°) enregistrement d'une série d'images, avec des temps de pose croissants,

3°) développement puis blanchiment. Toutes les conditions de traitement doivent être scrupuleusement connues,

4°) mesure des intensités des trois ordres centraux pour chacune des grilles ainsi réalisées. On obtient ainsi une courbe telle que celle de la figure GM.10. On détermine alors le temps de pose t_1 où l'égalité est vérifiée,

5°) enregistrement de la grille avec le temps de pose déterminé, puis surexposition d'un second enregistrement de la grille après rotation de cette dernière de 90°. On effectue encore plusieurs temps de pose pour la seconde exposition,

6°) développement,puis blanchiment dans des conditions strictement identiques,

7°) mesure des intensités des trois termes centraux correspondant à la deuxième exposition. On détermine ainsi le temps de pose t_2,

8°) enregistrement d'une série de double exposition avec des temps de pose voisins de t_1 et t_2,

9°) développement puis blanchiment,

10°) mesure des termes obtenus et choix de la meilleurs grille.

Cette méthode est longue et délicate. Il est en effet capital que les conditions des traitements chimiques soient scrupuleusement identiques, afin que la répétabilité soit la meilleure possible. Les résultats obtenus de cette façon sont aussi valables que ceux obtenus précédemment pour des fréquences plus basses.

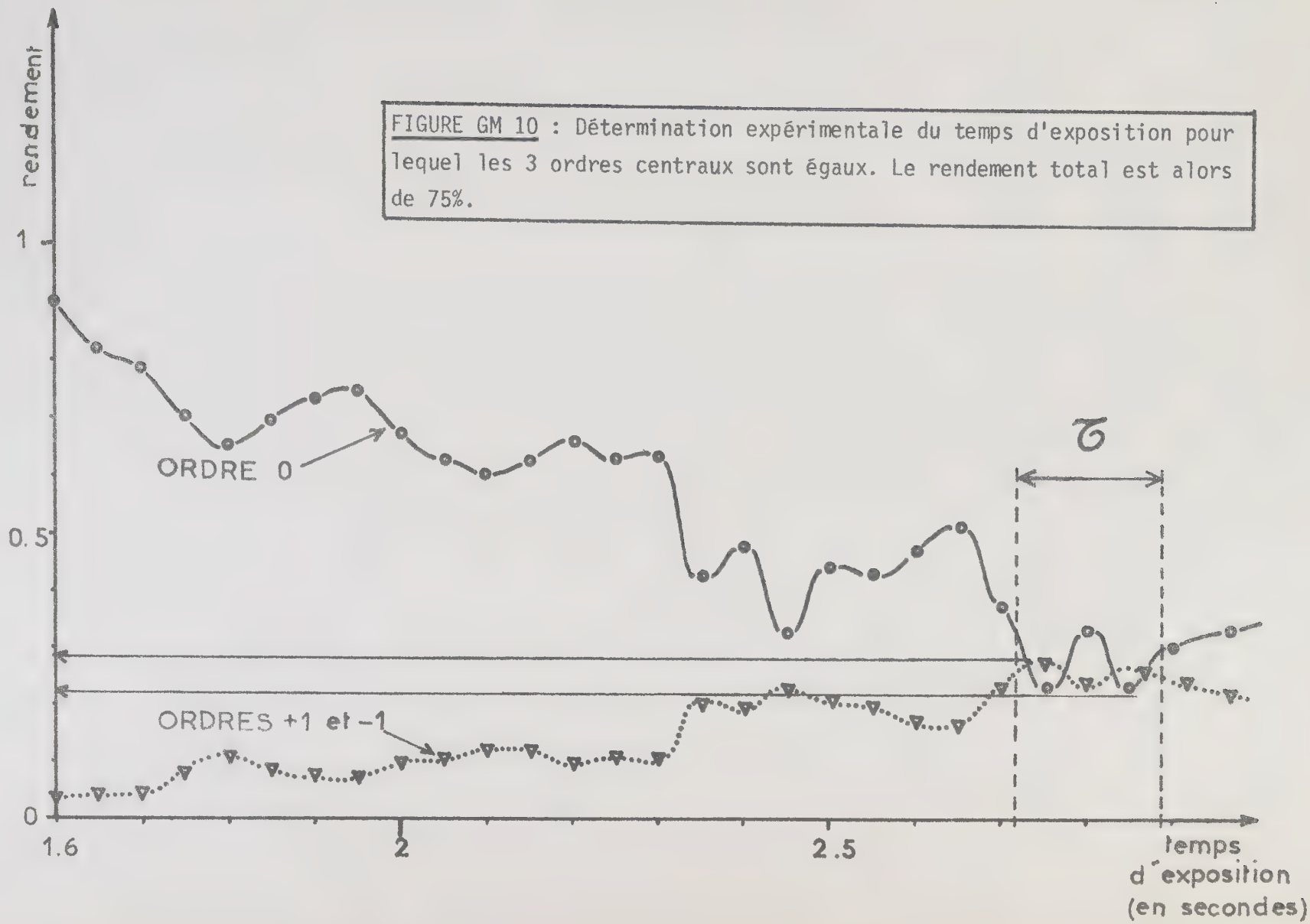


FIGURE GM 10 : Détermination expérimentale du temps d'exposition pour lequel les 3 ordres centraux sont égaux. Le rendement total est alors de 75%.

GM.V. CONCLUSION

Afin de réaliser la multiplication du spectre d'un objet, nous avons pu définir un type de grilles multiplicatrices présentant les deux caractéristiques suivantes :

a) facilité de réalisation
b) rendement optimal et bonne qualité optique.

Les grilles ainsi définies ont été réalisées et utilisées sur l'appareil décrit au chapitre précédent.

C H A P I T R E S.H.

SYNTHESE HARMONIQUE DE FONCTIONS PERIODIQUES

SH.I. INTRODUCTION

Les quelques travaux rapportés dans ce chapitre sont extraits d'une série de manipulations faites à propos de la notion de fréquence spatiale, et cela dans un esprit d'assimilation de cette dernière. A cette occasion, une technique de réalisation de fonctions périodiques par synthèse harmonique a été étudiée et présentée comme une utilisation possible des grilles multiplicatrices.

SH.II. PRINCIPE

La transformation de Fourier admet une transformation inverse. Il est donc possible de reconstituer n'importe quelle fonction possédant un spectre, en faisant la transformation de Fourier inverse de celui-ci. Une façon de réaliser une fonction donnée peut donc être d'en réaliser le spectre. Dans le cas général, cette opération est pratiquement impossible. Cependant, dans le cas des fonctions périodiques, le nombre de points nécessaires est considérablement réduit, du fait que la majeure partie de l'énergie se trouve concentrée en un petit nombre de points discrets, disposés aux noeuds d'un réseau.

En pratique, il est aisé d'obtenir un tel spectre synthétique à l'aide d'une grille multiplicatrice dont le spectre à la même configuration, en ajustant amplitude et phase de chaque terme à l'aide de densités et de lames déphasantes.

Un montage tel que celui représenté sur la figure SH.1 permet de réaliser une telle synthèse, dans le cas unidimentionnel, mais une extension au cas bidimensionnel est parfaitement envisageable.

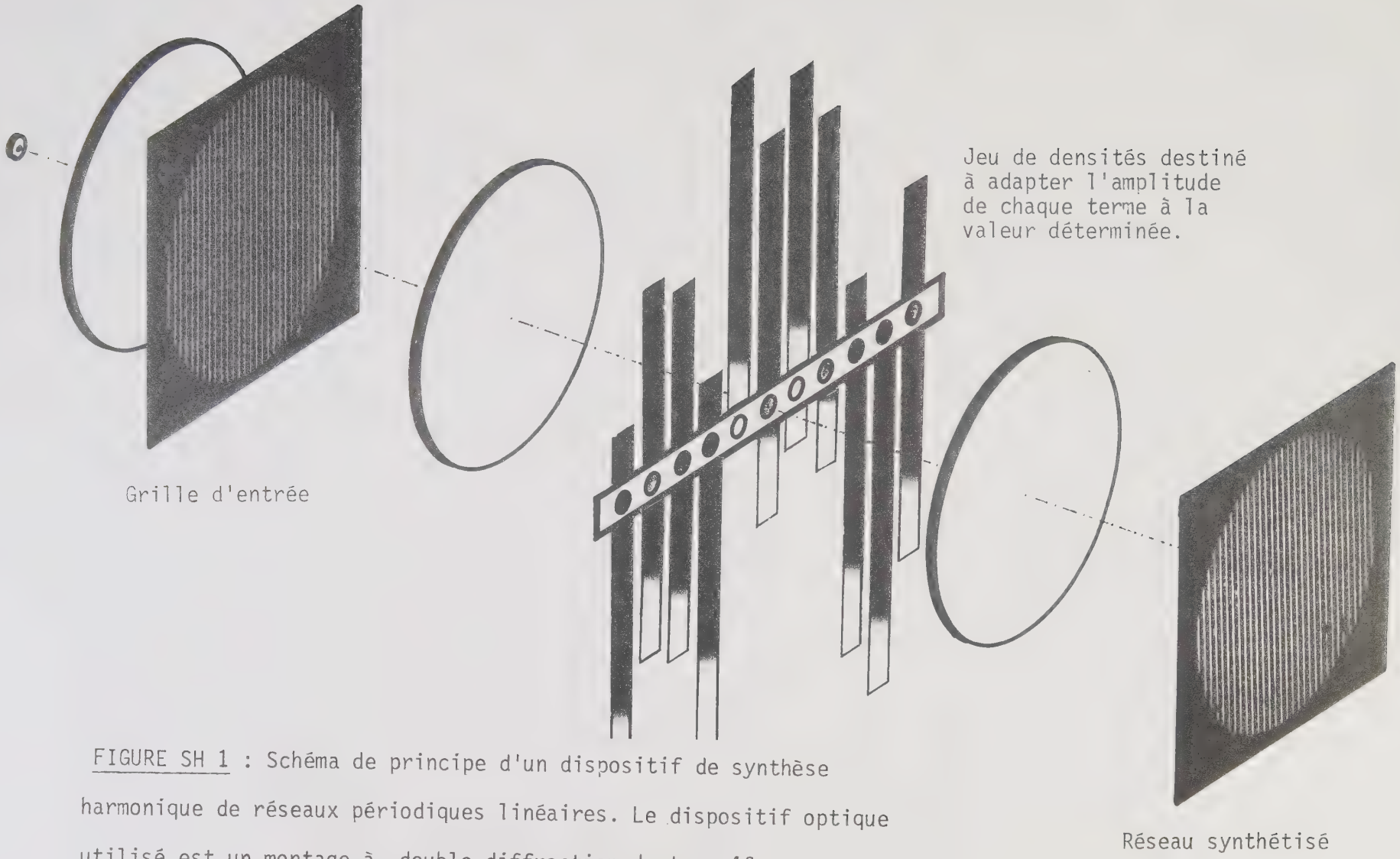


FIGURE SH 1 : Schéma de principe d'un dispositif de synthèse harmonique de réseaux périodiques linéaires. Le dispositif optique utilisé est un montage à double diffraction de type 4f.

Les différentes opérations permettant de réaliser une fonction périodique f(x,y) donnée sont les suivantes :

1°) Analyse de f(x,y), ou calcul de l'amplitude et de la phase de chaque terme de son spectre. Le calcul peut être fait de deux façons :

- soit directement par calcul de la transformation de Fourier. Cette méthode est la seule possible dans le cas des fonctions bidimensionnelles non décomposables en produit de fonctions unidimensionnelles.

- soit par décomposition en série de Fourier.
Dans le cas général, la décomposition sera de la forme :

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} z_n \, e^{\frac{2j\pi nx}{p}}$$, où z_n est l'amplitude du terme $\delta(u - np)$

du spectre de f(x). Ce nombre complexe détermine l'amplitude et la phase du point correspondant.

2°) Détermination du nombre de points du spectre permettant de réaliser f(x,y) avec la précision souhaitée. Deux critères de sélection peuvent être pris en compte :

- que l'énergie transmise soit supérieure à un certain pourcentage de l'énergie totale. Dans ce cas, les z_n étant calculés, on peut calculer la somme des N plus importants , la somme totale $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |z_n|^2$ et faire le rapport des deux. On détermine ainsi le nombre de termes à prendre en compte pour obtenir la précision souhaitée,

- que la différence entre la fonction souhaitée et la fonction réalisée soit toujours inférieure à une certaine valeur. Dans ce cas, l'utilisation d'un calculateur est indispensable.

3°) Réalisation du spectre de f(x,y) par modification du spectre d'une grille à l'aide de lames de phase et de densités. Selon le nombre de points nécessaires, il faudra utiliser différents types de grilles multiplicatrices. Dans le cas général unidimensionnel, un réseau de traits fins donnera un grand nombre de points qui suffira dans la majeure partie

des cas. La superposition de deux réseaux de ce type orientés différemment permettra de résoudre la majeure partie des problèmes à deux dimensions.

Afin de donner un aspect plus concret à ce qui précède, un exemple d'application est traité ci-dessous.

SH.III. EXEMPLE D'APPLICATION : SYNTHESE DE LA FONCTION ECHELETTE

Supposons que l'on souhaite réaliser une répartition d'amplitude lumineuse de type "échelette", de période p et d'amplitude a. La fonction f(x) représentant cette répartition est représentée figure SH.2.

Calcul des termes du spectre :

Afin de déterminer les termes spectraux, deux méthodes de calculs sont envisageables :

- développement en série de Fourier, puis transformation de Fourier,
- transformation de Fourier directe, en utilisant le formalisme des distributions.

Dans le cas présent, la première méthode est plus rapide et, en appelant F(u) la transformation de Fourier de f(x), il vient :

$$F(u) = \frac{a}{2}\,\delta(u) + \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{+\infty} \frac{a}{2in\pi}\left[\delta\left(u - \frac{n}{p}\right)\right]$$

F(u) est la distribution complexe représentée figure SH.3.

Détermination du nombre d'harmoniques nécessaires :

La valeur de chacun des termes spectraux étant déterminée, il reste à calculer le nombre d'harmoniques permettant de réaliser f(x) avec suffisamment de précision. On adopte comme critère de précision le dépassement d'un certain pourcentage de l'énergie lumineuse due aux termes de modulation (tous les termes sauf le terme central, qui correspond au fond continu).

L'énergie de modulation totale est proportionnelle à

$$2\sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{+\infty} \left(\frac{1}{2n\pi}\right)^2 = \frac{1}{2\pi^2}\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2}$$

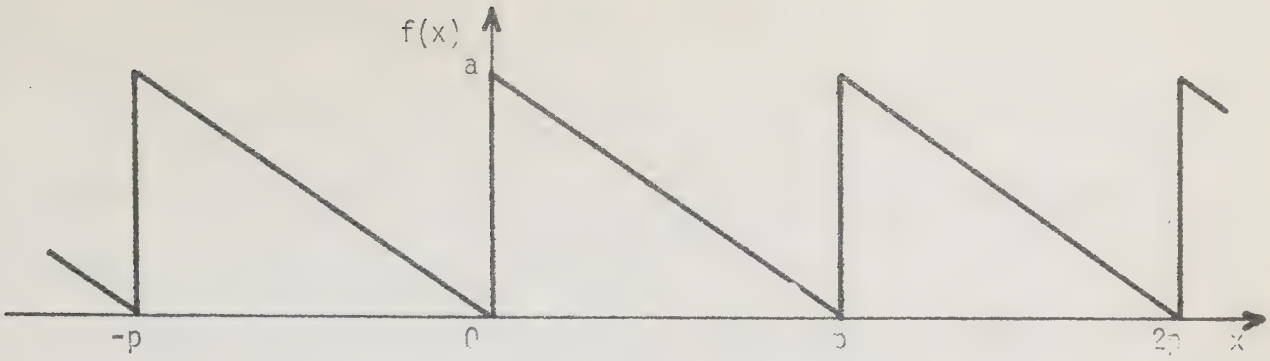


FIGURE SH 2 : Exemple de profil périodique : la fonction "échelette" de période p et d'amplitude a.

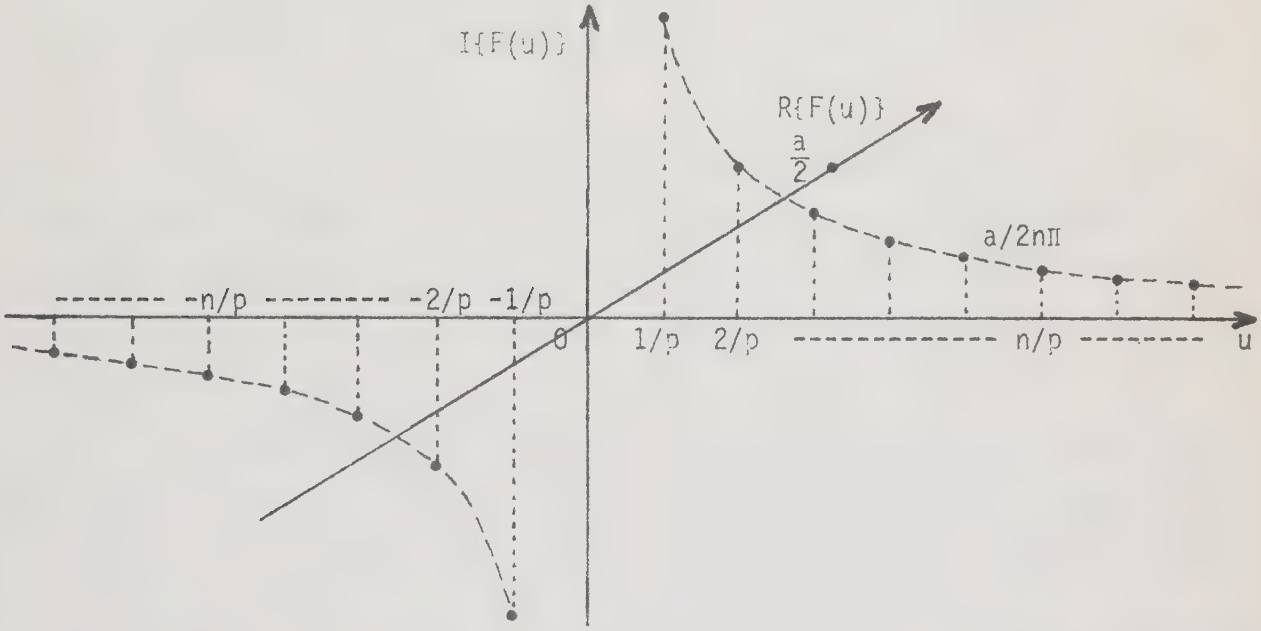


FIGURE SH 3 : Spectre de la fonction échelette. L'enveloppe des termes imaginaires est l'hyperbole $y = \frac{a}{2\Pi p u}$.

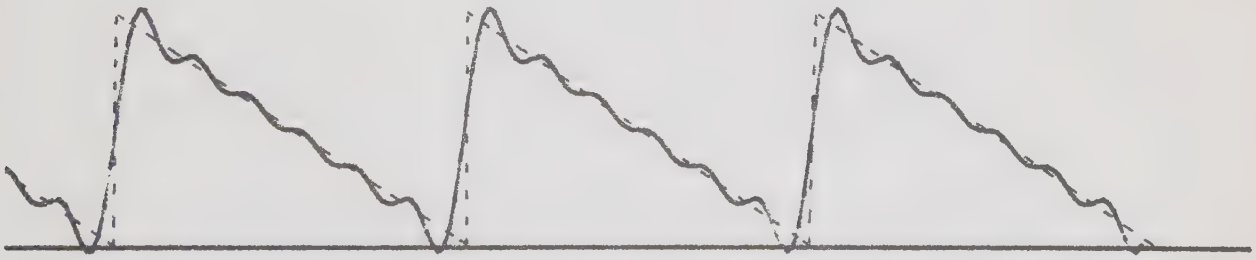


FIGURE SH 4 : Résultat théorique,obtenu par calculateur, de la synthèse harmonique de la fonction échelette à l'aide de ses 6 premiers harmoniques.

Or la somme $\sum_n$ de la série de Riemann $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ n'est autre que $\frac{\pi^2}{6}$.

Si on appelle $S_N = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{n^2}$ la somme partielle correspondant aux N premiers termes et k_N le rapport $k_N = \frac{S_N}{\sum_n}$, on obtient pour différentes valeurs de N, les valeurs k_N suivantes :

N	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20
k_N	0,61	0,76	0,83	0,87	0,89	0,91	0,92	0,94	0,96	0,97

On peut considérer que la synthèse de f(x) avec 6 termes harmoniques seulement, soit 13 termes spectraux, est une assez bonne approximation, puisque 91 % de l'énergie de modulation y est représentée. La figure SH.4 permet d'ailleurs de juger du résultat théorique.

Calcul des densités :

Après les calculs préliminaires, il reste à réaliser pratiquement la synthèse, et pour cela à calculer quelles doivent être les valeurs des transparences ou des densités à utiliser sur les termes spectraux dans un montage optique tel que celui représenté figure SH.1.

Si la grille d'entrée est un réseau de traits fins, assimilable à la distribution $\underline{///}\ (\frac{x}{p})$, les termes de son spectre sont égaux en amplitude et phase . Afin de synthétiser F(u) à l'aide de ce spectre, les termes latéraux doivent être déphasés par rapport au terme central, de $2k\pi + \frac{\pi}{2}$ d'un côté, de $2k\pi - \frac{\pi}{2}$ de l'autre. D'autre part, la densité à intercaler devant le terme d'ordre n est $D_n = \log_{10} \frac{\pi^2 n^2}{4}$ pour $n \neq 0$ et $D_0 = 0$.

Puisqu'on a montré que 6 harmoniques permettent d'approcher f(x) avec suffisamment de précision, les valeurs des densités à utiliser sont donc les suivantes :

n	0	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6
D_n	0	0,39	0,99	1,35	1,6	1,79	1,94

Réalisation pratique :

La manipulation correspondant à l'exemple étudié a été effectuée, mais l'incertitude sur la phase des densités utilisées n'a pas permis d'obtenir les résultats espérés. Ces densités ont en effet été réalisées sur plaques holographiques et présentent des variations de phase incompatibles avec la précision demandée. Les seuls résultats pratiques obtenus sont ceux pour lesquels l'opération d'ajustage des termes consistait à la suppression de certains d'entre eux.

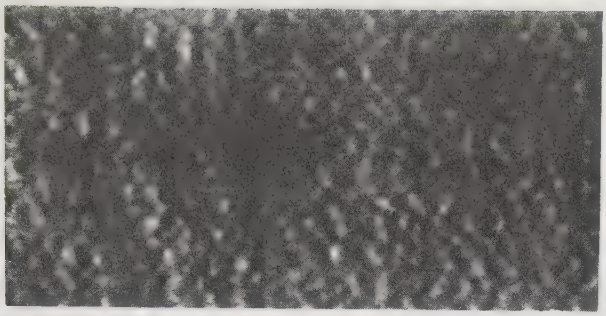
C'est par exemple le cas de la manipulation de multiplication par 3 de la fréquence d'une mire créneau, qui consiste à ne conserver du spectre que les termes d'ordre n tels que $n = \pm 3k$ (k entier).

SH.IV. RESULTATS DIVERS

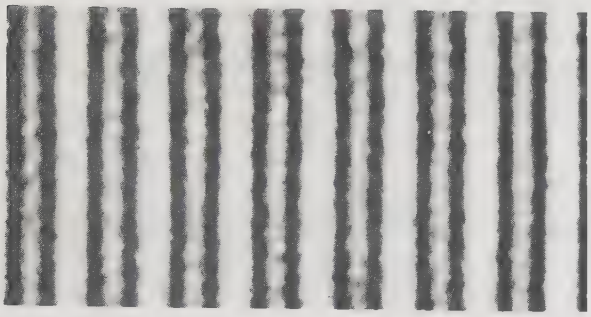
Du fait du peu de moyens techniques mis en oeuvre, aucun résultat pratique ne vient étayer le procédé proposé. Cependant, de nombreuses manipulations ayant été effectuées sur ce sujet, nous présentons quelques résultats obtenus à cette occasion. Tout d'abord, la figure SH.5 représente l'expérience de la synthèse harmonique de la fonction créneau de phase, utilisant un nombre croissant d'harmoniques. On observe le même phénomène que dans le cas du créneau d'amplitude, mais avec une diminution de la visibilité des franges. Ce résultat est évidemment logique, puisque lorsque tous les harmoniques sont transmis, le créneau de phase devient invisible.

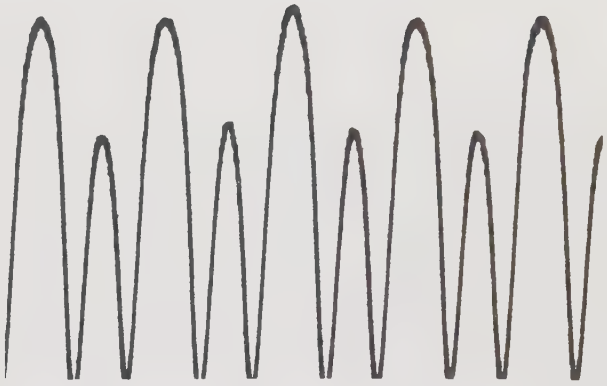
Sur la figure SH.6 sont représentés divers profils obtenus en réalisant l'expérience d'ABBE avec un réseau de phase.

La défocalisation introduit un déphasage entre les harmoniques, rendant visible la périodicité du réseau. Une expérience identique à l'aide d'un réseau à deux dimensions permet d'observer un phénomène analogue.

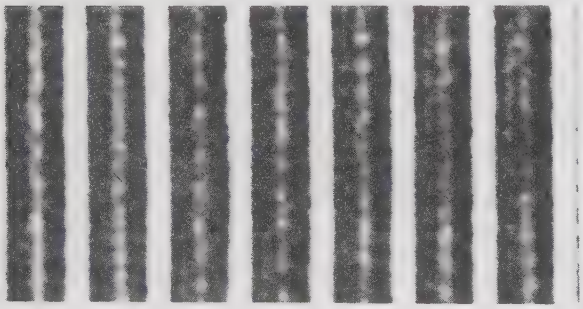


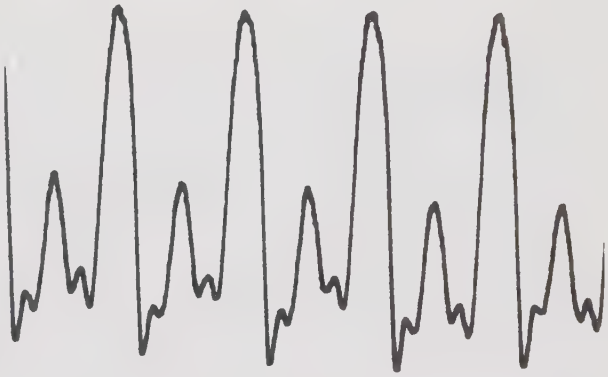
Valeur moyenne.



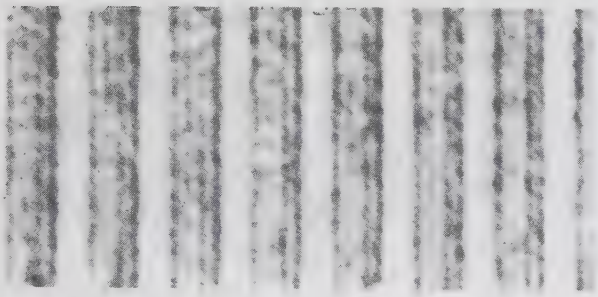


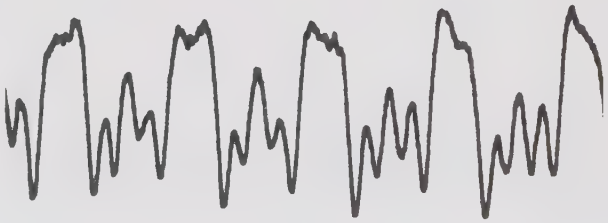
Valeur moyenne + fondamental.





Valeur moyenne + fondamental
+ harmonique 1 .





Valeur moyenne + fondamental
+ harmoniques 1 et 2 .

FIGURE SH 5 : Synthèse harmonique d'une grille de phase du type créneau.
La visibilité diminue quand le nombre d'harmoniques utilisés croît.

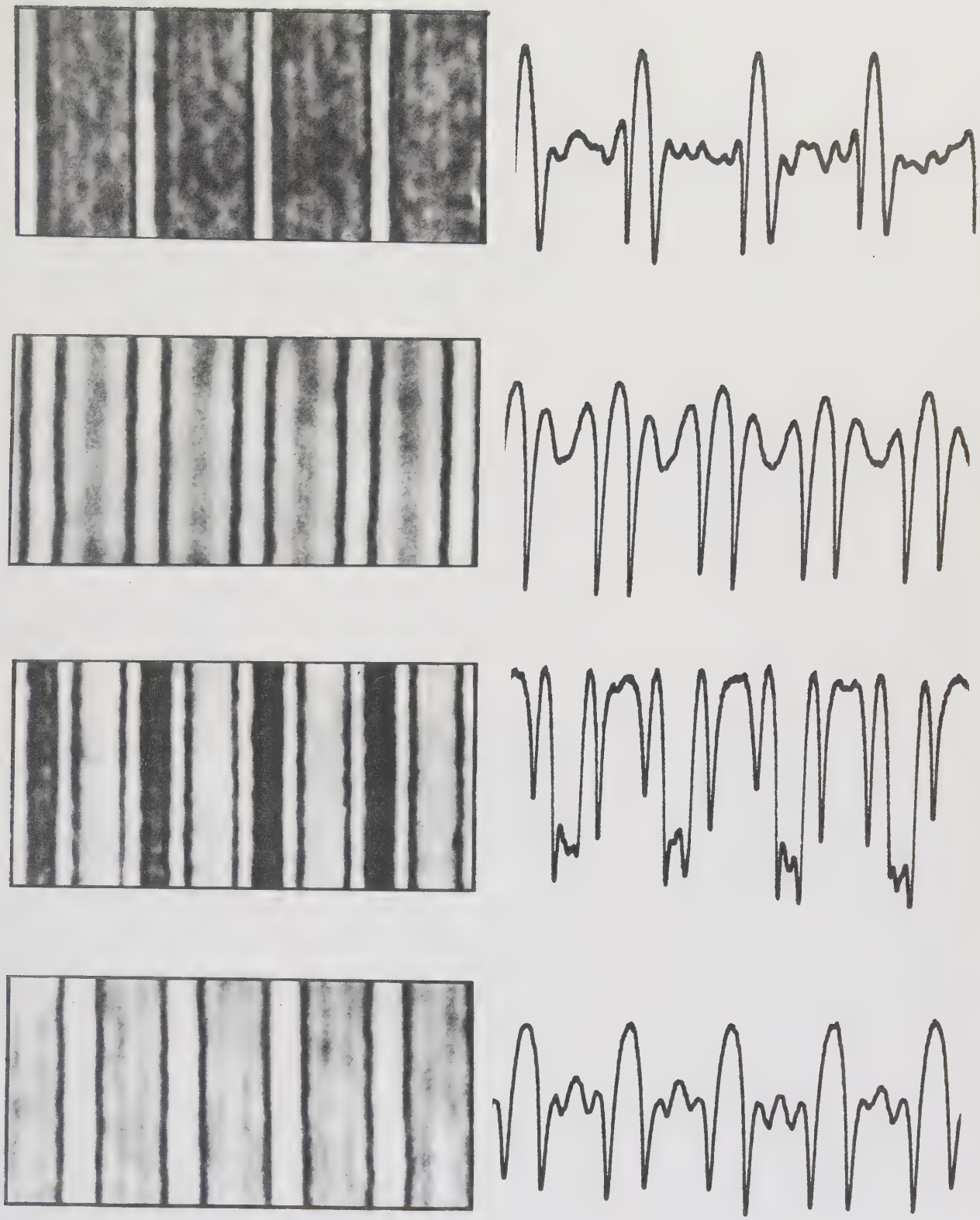


FIGURE SH 6 : Visualisation d'un réseau de phase par défocalisation. Le même réseau périodique, observé dans différents plans défocalisés, donne lieu à différents profils, tous de même période. Ce phénomène est dû au glissement de phase des harmoniques.

Les planches suivantes ont été réalisées à l'aide d'une grille multiplicatrice délivrant 9 termes identiques disposée selon une matrice 3 x 3. Elles présentent les allures des réseaux obtenus avec toutes les dispositions possibles de points choisis parmi les 9.

SH.V. CONCLUSION

Les quelques travaux rapportés ici n'ont d'intérêt que par l'enseignement personnel que j'en ai tiré, principalement sur la notion de fréquence spatiale.

Tous les pièges et "faux-amis" que cet outil, fort simple à priori, a dressé devant mes investigations, m'ont appris à m'en méfier et à ne le manipuler qu'avec extrême prudence.

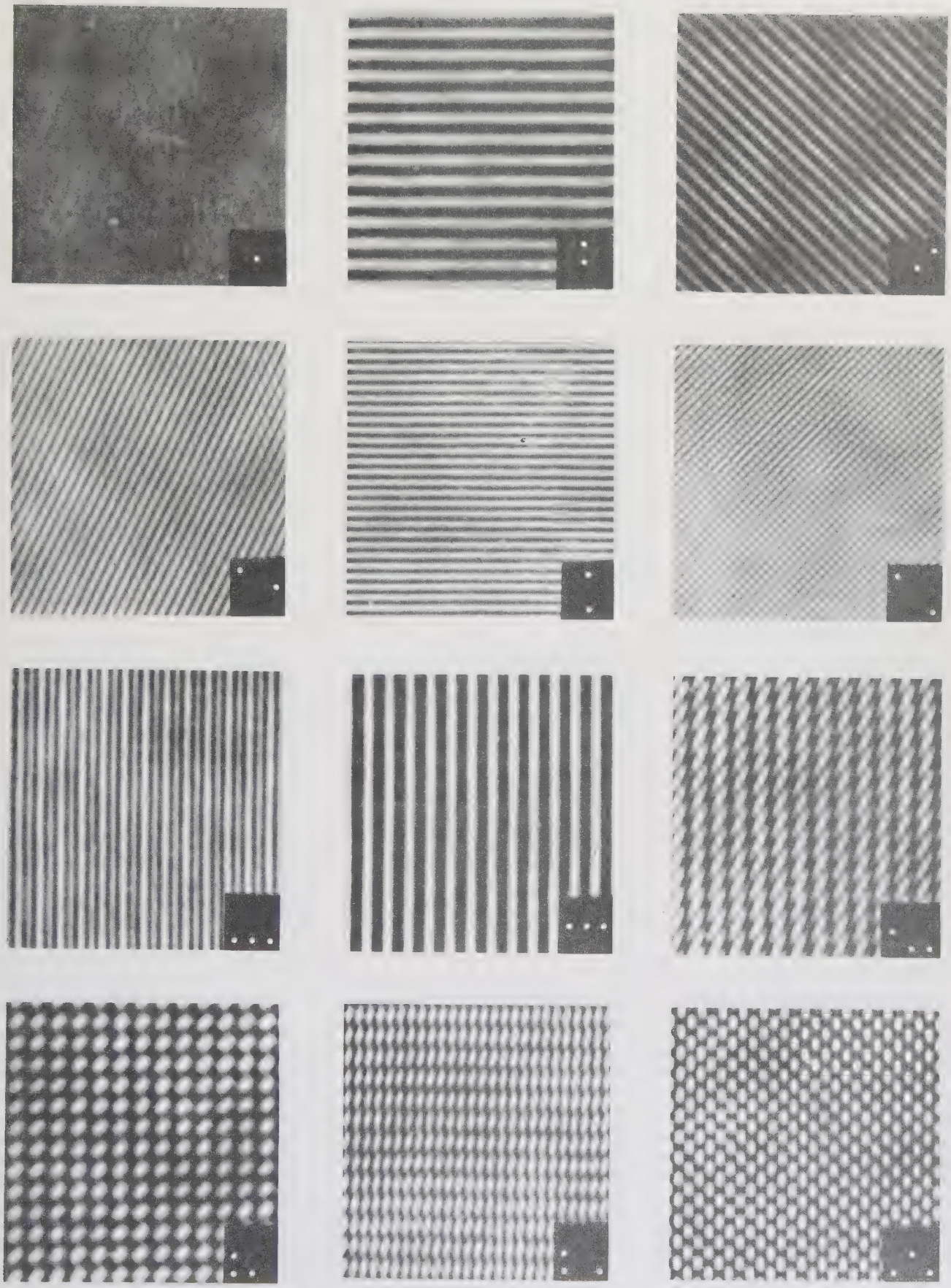


FIGURE SH 7-a : Réseaux périodiques obtenus par combinaisons de 9 points d'égale amplitude disposés selon une matrice 3 x 3 .

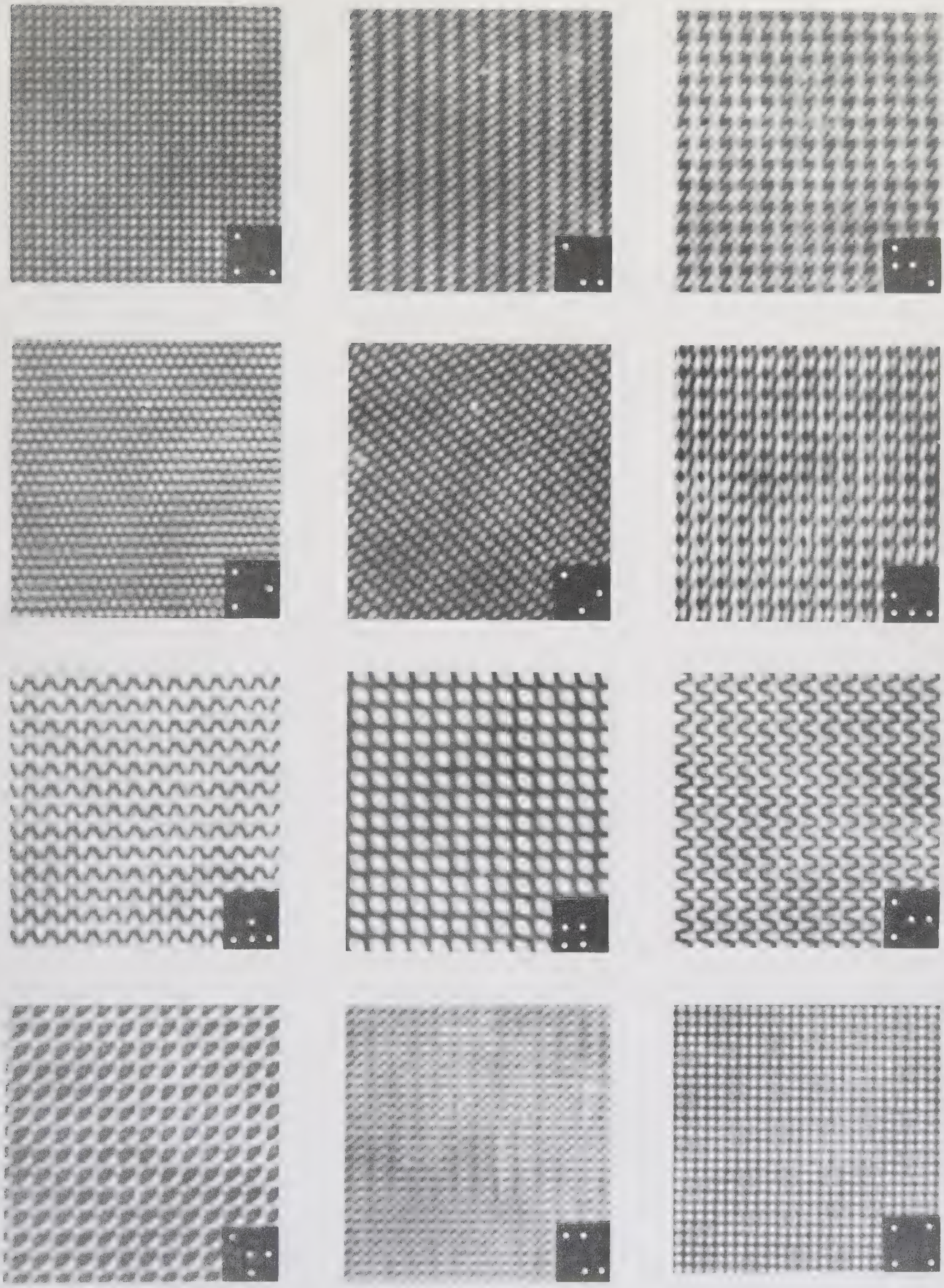


FIGURE SH 7-b

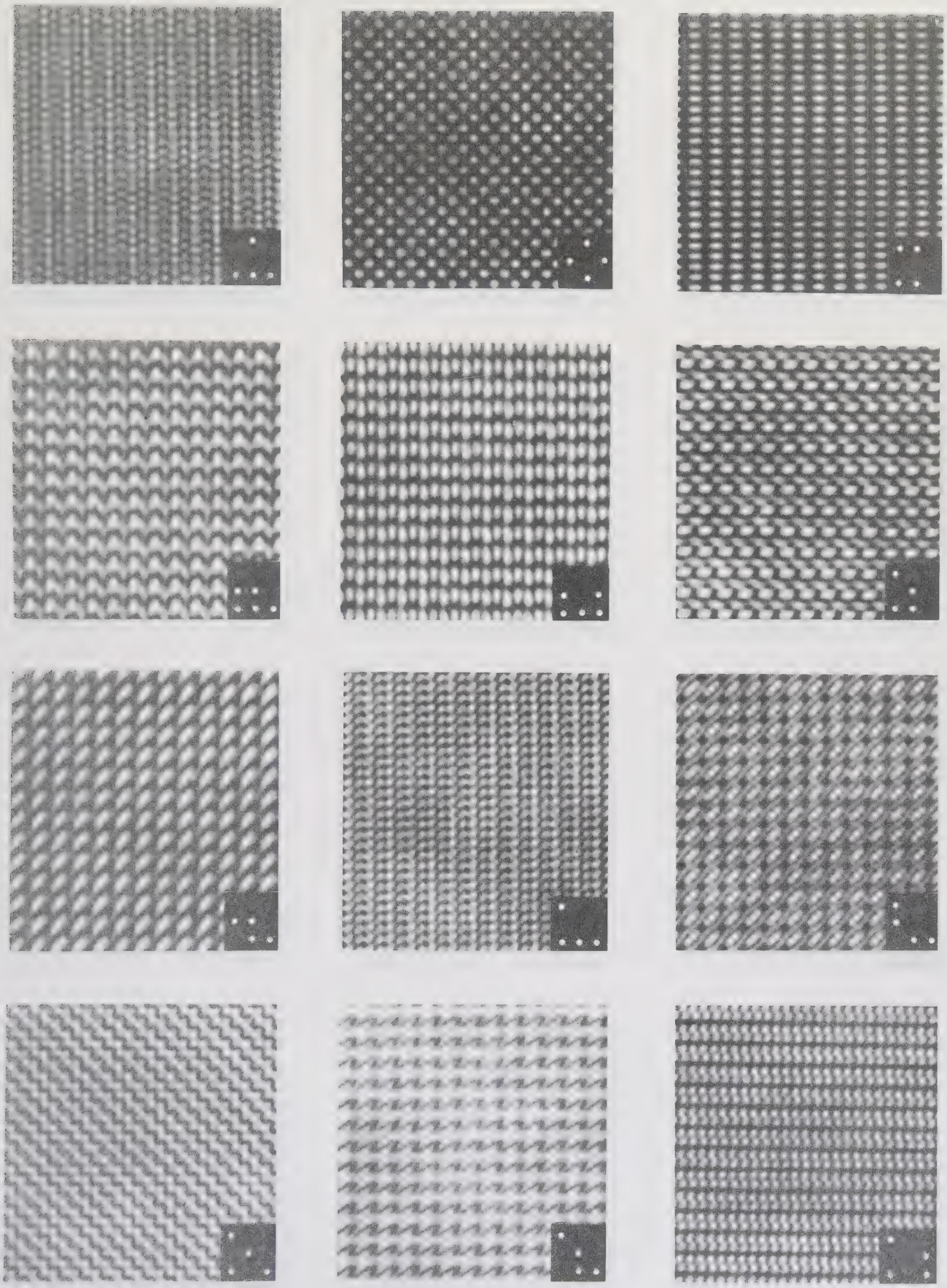


FIGURE SH 7-c

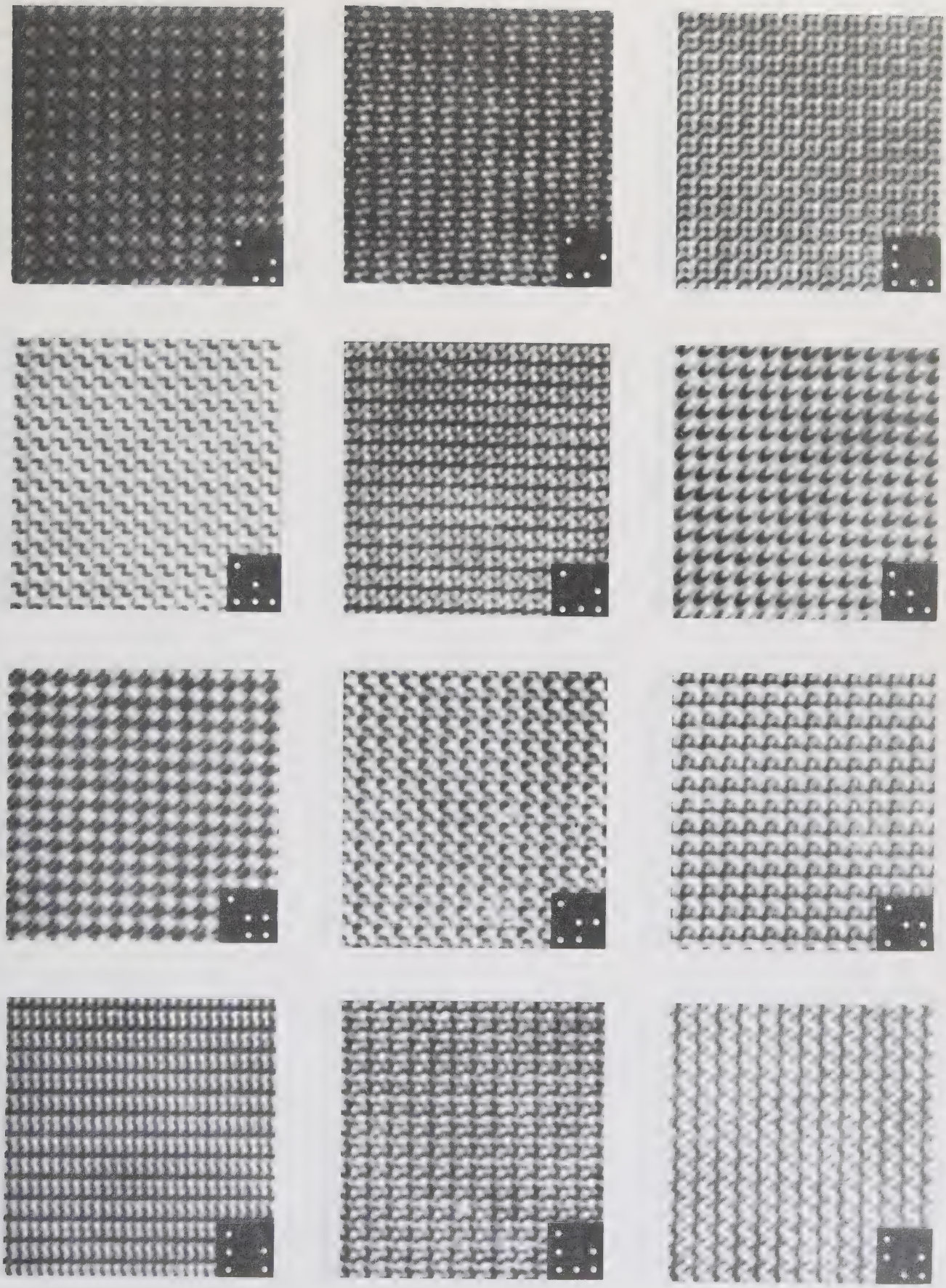


FIGURE SH 7-d

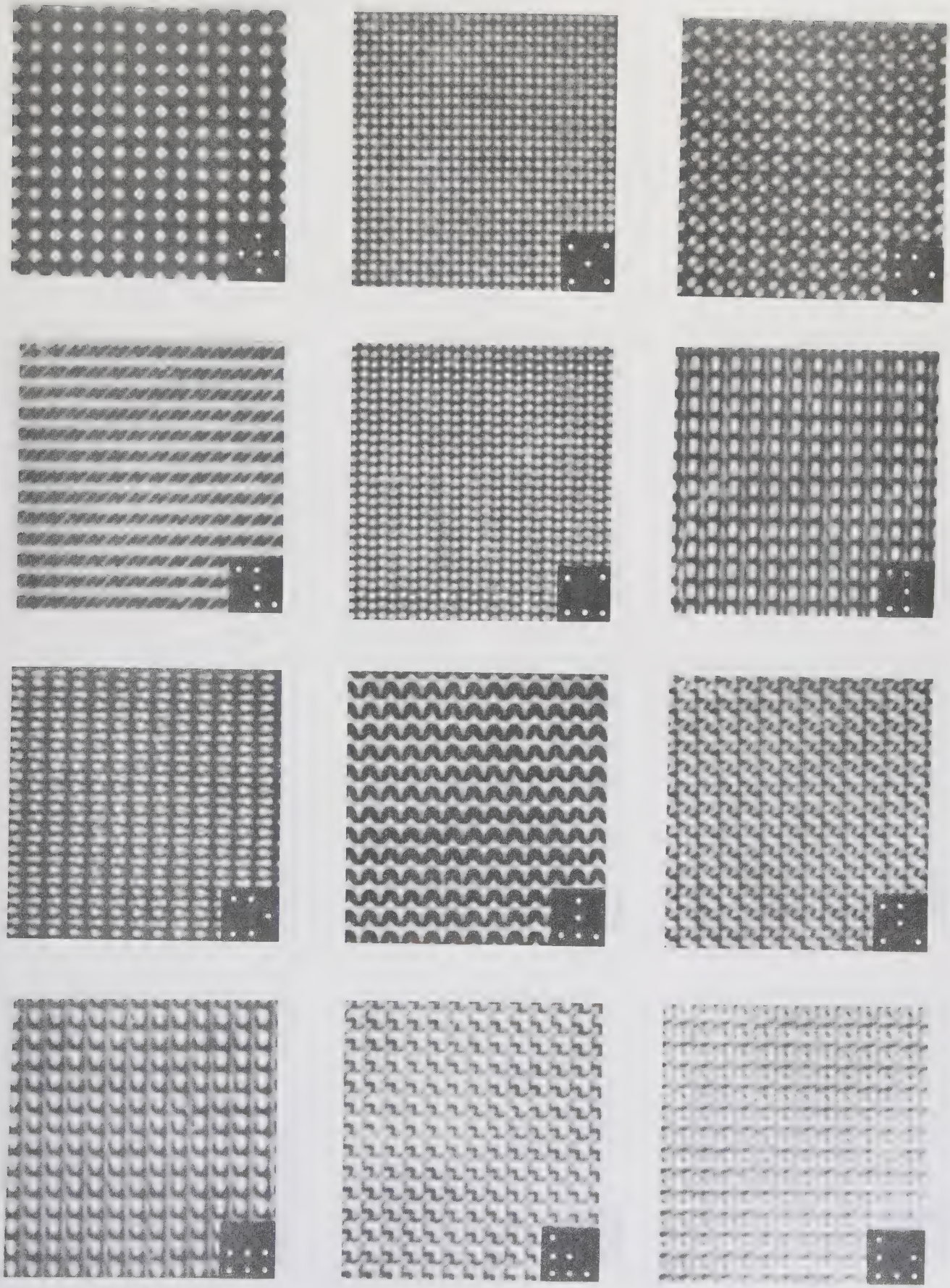


FIGURE SH 7-e

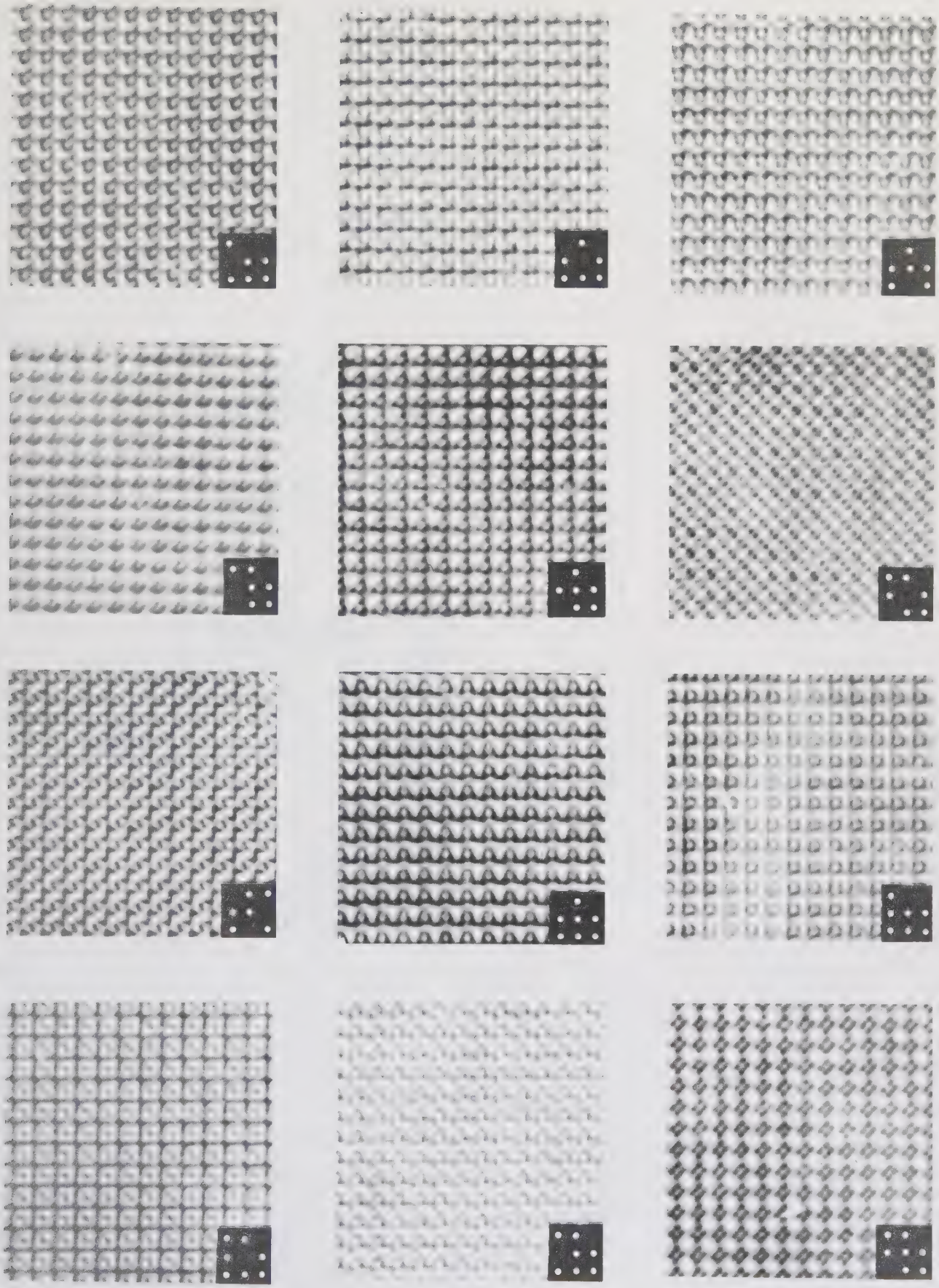
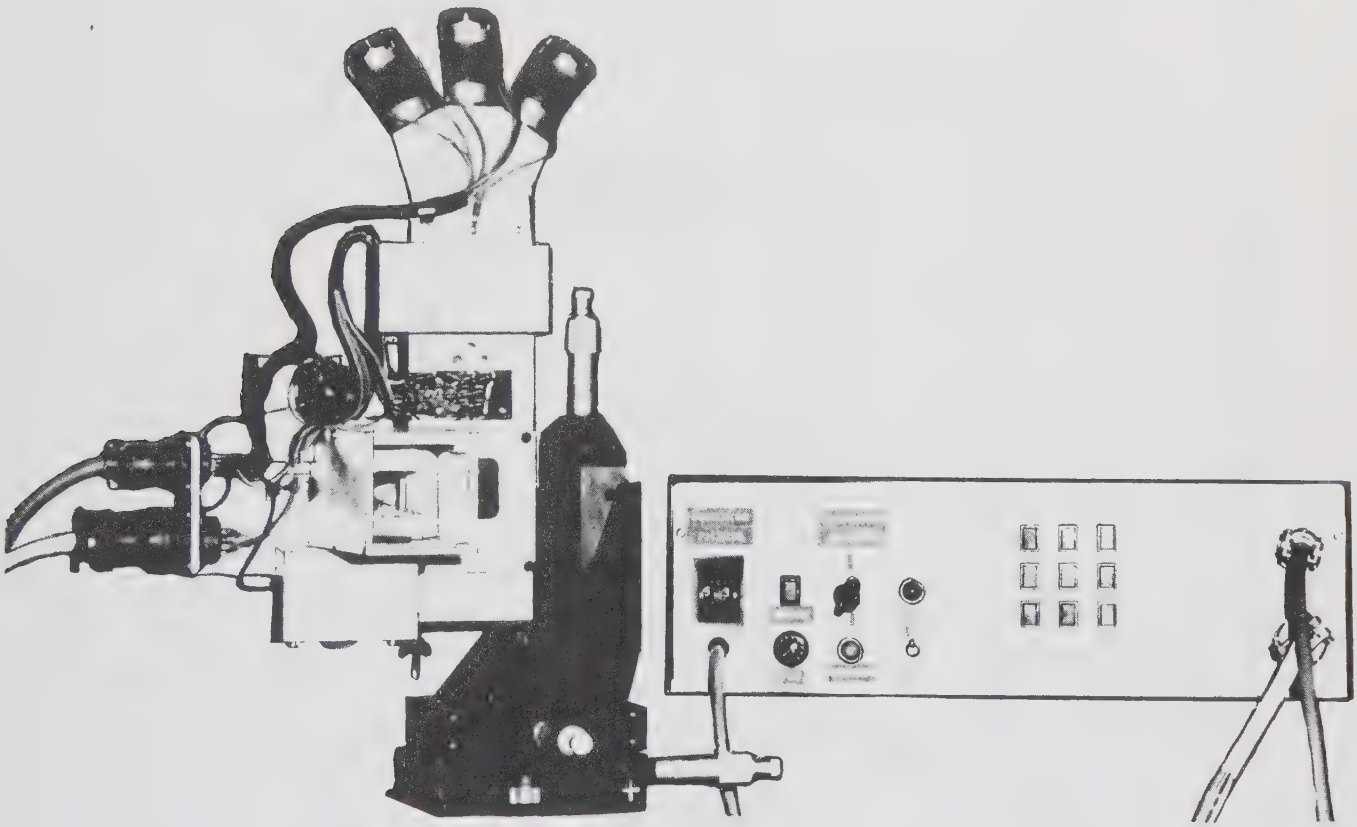
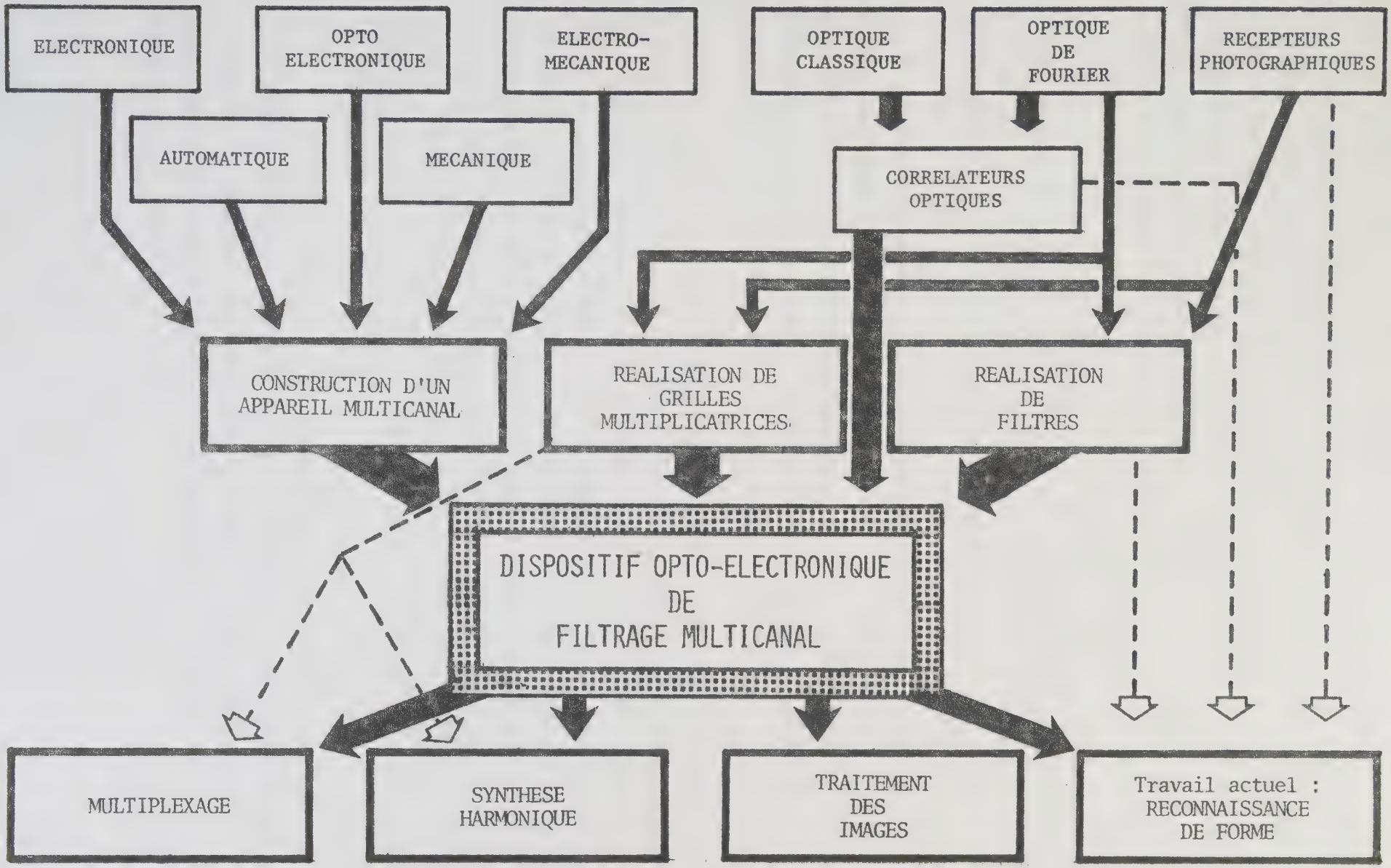


FIGURE SH 7-f

Tout texte qui chercherait à conclure ce travail serait artificiel, en ce sens qu'il s'agissait principalement de la réalisation d'un appareillage, c'est à dire d'une mise en oeuvre de méthodes et de techniques, d'une mise au point accompagnée de réglages, et enfin d'illustrations en termes de performances. Aussi préférons-nous présenter une photographie de l'ensemble de l'appareil.



Il s'agit donc d'un dispositif de filtrage utilisant essentiellement des filtres disposés dans le plan de Fourier. Le changement automatique de ces filtres sur 9 canaux permet un grand nombre de combinaisons, et ce d'autant que l'on peut placer tout aussi bien des filtres adaptés (hologrammes de Fourier) ou des filtres d'amplitude binaires - ce qui est le cas dans la version que nous avons mise en exploitation.


ELECTRONIQUE
OPTO ELECTRONIQUE
ELECTRO-MECANIQUE
OPTIQUE CLASSIQUE
OPTIQUE DE FOURIER
RECEPTEURS PHOTOGRAPHIQUES
AUTOMATIQUE
MECANIQUE
CORRELATEURS OPTIQUES
CONSTRUCTION D'UN APPAREIL MULTICANAL
REALISATION DE GRILLES MULTIPLICATRICES
REALISATION DE FILTRES
DISPOSITIF OPTO-ELECTRONIQUE DE FILTRAGE MULTICANAL
MULTIPLEXAGE
SYNTHESE HARMONIQUE
TRAITEMENT DES IMAGES
Travail actuel : RECONNAISSANCE DE FORME

Sur le plan personnel, l'étude et la réalisation de l'ensemble représente pour nous une synthèse des connaissances théoriques acquises en temps qu'élève Ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille, et de l'initiation large à l'opto-électronique doublée d'une pratique expérimentale, justifiant ma position de boursier C.N.R.S. au Laboratoire d'Optique de Besançon.

Le problème posé nécessitait d'abord une confrontation directe aux problèmes de filtrage complexe. Pour le praticien néophyte, il n'est pas jusqu'à la notion même de fréquence spatiale, pourtant évidente de prime-abord, qui ne réserve bien des surprises.

Une part importante du travail se rapporte aux grilles multiplicatrices : elle a permis d'approfondir les difficultés qu'introduit le récepteur photographique ; de plus, elle suggère de nombreuses applications dans le domaine aval, notamment celui de la multiplication des images, utilisable industriellement.

Nous pensons aussi avoir adopté la tournure d'esprit propre à l'optique de Fourier, ayant acquis une véritable spécialisation, d'ores et déjà illustrée sur un problème concret de reconnaissance de forme en temps réel. Ce travail de Docteur-Ingénieur était pratiquement terminé il y a près d'un an, quand un très vaste projet proposé au Laboratoire par la Régie Nationale des Usines Renault a été entrepris en partie grâce à la spécialisation à laquelle il a été fait allusion. Et même si la rédaction du présent manuscrit et quelques ultimes réglages ont, de ce fait, été retardés, le terme de "retombées" de l'étude n'en a que plus de sens.

Qu'il me soit permis de terminer par un tableau synoptique où figurent, schématiquement, à la fois les principes, les démarches et les résultats actuels, laissant libre un champ d'investigation et, nous l'espérons, plus simplement d'utilisation du corrélateur multicanal (ou "filtreur").

R E F E R E N C E S

FC 1 P.M. DUFFIEUX : L'intégrale de Fourier et ses applications Masson 1970

FC 2 A. MARECHAL - M. FRANCON : Diffraction, structure des images Masson 1970

FC 3 J.W. GOODMAN : Introduction à l'optique de Fourier et à l'holographie - Masson 1972

FC 4 M. FRANCON : Le microscope à contraste de phase et le microscope interférentiel. Editions du C.N.R.S. 1954

FC 6 P.Y. BAURES : Thèse de Docteur-Ingénieur (à paraître) Besançon 1977

FC 7 J. SOYER : Revue archéologique de Narbonnaise VII - 1975 Fig. 45

FC 8 A. VAN DER LUGT : IEEE Transaction on Information Theory 10.2.1964 p. 139

FC 9 A. VAN DER LUGT et al. : Opt. and Elec. Opt. Inf. Proc. Tippett Ed. 1965.

FC 10 M. TREHEUX : Symposium international d'Holographie Besançon 1970 p.13.3

FC 11 J.C. VIENOT - J. BULABOIS - L.R. GUY : Optics communications 9.2.1971 p.431 et
L.R. GUY : Thèse de Docteur-Ingénieur Besançon 1971

FC 12 G.WINZER : International Optical Computers Conference ZURICH 1974 p.9

FC 13 M. KOCK - G. RABE : Optics Communications 5 1972 p.73

FC 14 J.L. TRIBILLON : Thèse - Besançon 1973 - 3ème partie

AM 1 cf GM1 et GM 2

AM 2 par exemple : J.P. PERRIN - M. DENOUETTE - E. DACLIN : Systèmes logiques T.1 ch.1 Dunod 1967

GM 1 J.L. TRIBILLON : Thèse Besançon 1973 1ère et 2ème parties

GM 2 N. AEBISCHER - A.B. AGBANI : Nouvelle revue d'Optique 1975 p. 37 et A.B. AGBANI : Thèse Besançon 1975

GM 3 L.P. BOIVIN : Applied Optics 1972 p. 1782

GM 4 Par exemple : G. PETIAU : La théorie des fonctions de Bessel, Editions du C.N.R.S. 1955

A 1 A. JACOBSON et al. : Optical Engineering 1975 43 p. 217

A 2 J. UPATNIEKS et C. LEONARD : Applied Optics 1969 - 8 - 1 p. 85

A N N E X E I

PROJET D'OBTURATEUR MULTIPLE UTILISANT DES CRISTAUX LIQUIDES

Lorsque le problème de la réalisation d'un obturateur multiple a été examiné, de nombreuses possibilités ont été étudiées et un projet utilisant le pouvoir rotatoire des cristaux liquides nématiques a été élaboré. Un tel procédé présentait les deux intêrets suivants :

- possibilité d'intégrer un grand nombre d'obturateurs commandés séparément sur une très petite surface,
- possibilité d'utiliser chaque obturateur comme atténuateur variable, et non en "tout ou rien" comme un obturateur mécanique.

Ce projet n'a pas été réalisé, car nous pensions à l'époque que l'état mésomorphe des cristaux liquides risquait d'être générateur de distorsions importantes, incompatibles avec leur utilisation en optique cohérente. Aussi avions-nous préféré opter pour une solution mécanique dont le fonctionnement était assuré, plutôt que de risquer un échec en nous lançant dans une longue étude dont les résultats n'étaient pas certains. La suite nous a appris que nous avions eu tort sur ce point, car entre temps les chercheurs des Hughes Research Laboratories ont pu réaliser un convertisseur d'images incohérent/cohérent utilisant un principe analogue (A.1). La figure A.1 représente le projet initial d'obturateur multiple ainsi que le schéma de principe du convertisseur à cristaux liquides de Hughes.

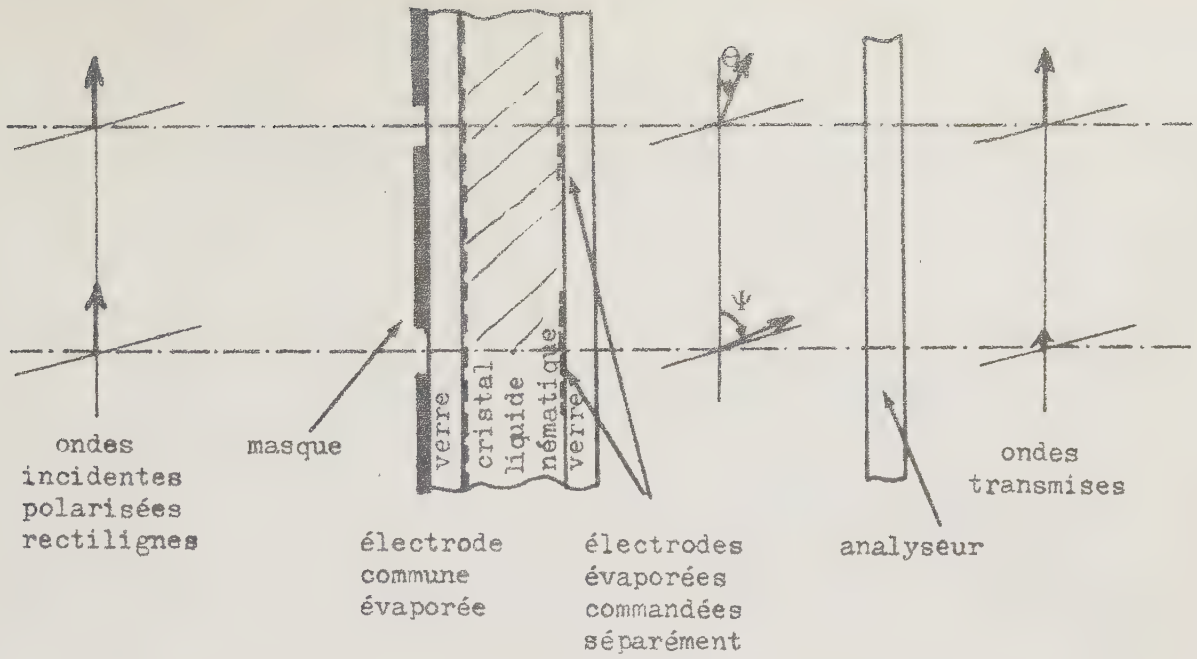
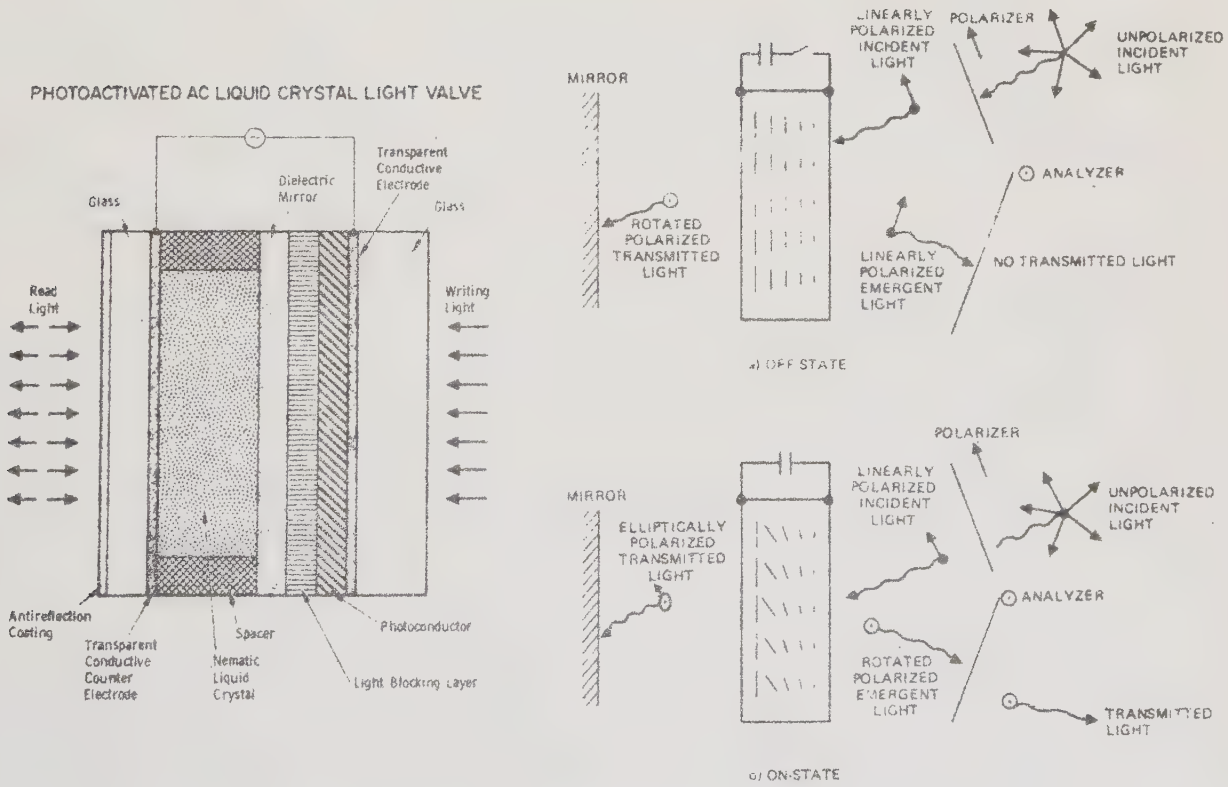


Schéma du principe d'un obturateur multiple fonctionnant à l'aide de cristaux liquides.



Le convertisseur incohérent/cohérent des laboratoires de recherche de Hughes. La figure de droite montre le principe de l'utilisation en obturateur.

FIGURE A 1.

A N N E X E I I

LE BLANCHIMENT DES EMULSIONS PHOTOGRAPHIQUES

Lorsque les premiers hologrammes ont fait leur apparition, les seuls récepteurs photographiques existant étaient les émulsions à base d'argent. Il s'agissait donc alors uniquement d'hologrammes d'amplitude. Le rendement en diffraction de ces derniers atteint vite la limite théotique de 4 %, qu'il est impossible de dépasser avec ce type d'hologramme, sauf en utilisant des techniques de "blazing".

Pour augmenter ce rendement, de nombreuses études ont été menées dans le but de réaliser des hologrammes de phase, dont le rendement peut théoriquement être de 50 % dans un ordre diffracté, et même 100 % pour un hologramme blazé. C'est ainsi qu'est apparue la famille des photorésists. Ces récepteurs, de très bonne qualité, ne sont cependant pas encore disponibles comme les plaques ou filtres photographiques. Aussi leur utilisation est encore très délicate, et leur coût relativement élevé. C'est pourquoi les techniques de blanchiment des émulsions photographiques ou holographiques présentent encore actuellement un intêret certain.

Ces techniques sont très anciennes, puisqu'elles sont apparues peu après les débuts de la photographie. Elles étaient alors utilisées comme opération intermédiaire dans les traitements chimiques de virage de teinte, et d'inversion de contraste. Cette dernière application est d'ailleurs maintenant extrêmement courante, puisque le tirage des diapositives en couleurs est réalisé par cette méthode.

Le principe général est toujours le même. Dans le cas de la photographie noir et blanc, le blanchiment consiste à recombiner l'argent (noir) pour former un sel (en général plus ou moins blanchâtre). Dans certaines conditions, on obtient ainsi une image parfaitement transparente dont l'épaisseur est à peu près proportionnelle à la quantité d'argent initiale. Cette transparence se comporte donc comme un objet de phase pure.

L'inconvénient principal est qu'il subsiste toujours un voile blanchâtre très fortement diffusant qui introduit donc un bruit parasite souvent très important. C'est pourquoi de nombreux chercheurs ont tenté d'optimiser ces techniques en vue de leur application à l'holographie. De nombreuses solutions ont été étudiées par J. UPATNIEKS et C. LEONARD (A2), puis au LOBE par N. AEBISCHER, qui a fait une étude systématique d'un grand nombre de techniques de blanchiment.

Le traitement nous ayant donné les meilleurs résultats pour la réalisation des grilles multiplicatrices sur film holographique 10 E 75 blanchi est le suivant :

1°) après enregistrement du réseau, le film est normalement développé dans du D 19, fixé dans du F5 (KODAK), puis lavé à grande eau,

2°) il est ensuite passé 3 mn dans le bain de blanchiment obtenu en mélangeant les solutions A et B ci-dessous, à volume égal :

Solution A :

$K_2 Cr_2 O_7$ ...	23 g
$H_2 S O_4$ pur ...	14 cc
eau q.s.p. ...	1 l

Solution B :

Na Cl ...	45 g
eau q.s.p. ...	1 l

3°) le film est lavé à grande eau pendant 5 mn,

4°) bain de fixage : solution de $Na_2 S_2 O_3$ à 120 g/l,

5°) lavage et séchage.

On obtient de cette façon des grilles de phase parfaitement transparentes qui ne présentent pas de détérioration notable au cours du temps.

A N N E X E III

PLANS DES ELEMENTS MECANIQUES

DE L'UNITE ACTIVE DE L'APPAREIL MULTICANAL

L'ensemble mécanique réalisant les changements de filtre et la sélection des canaux est composé de plus de 50 pièces mécaniques, qui ont toutes été réalisées à l'atelier de mécanique du LOBE, à l'exception de la pignonnerie qui est constituée de matériel courant adapté pour la circonstance. Nous n'avons regroupé ici que les plans des pièces principales de l'ensemble.

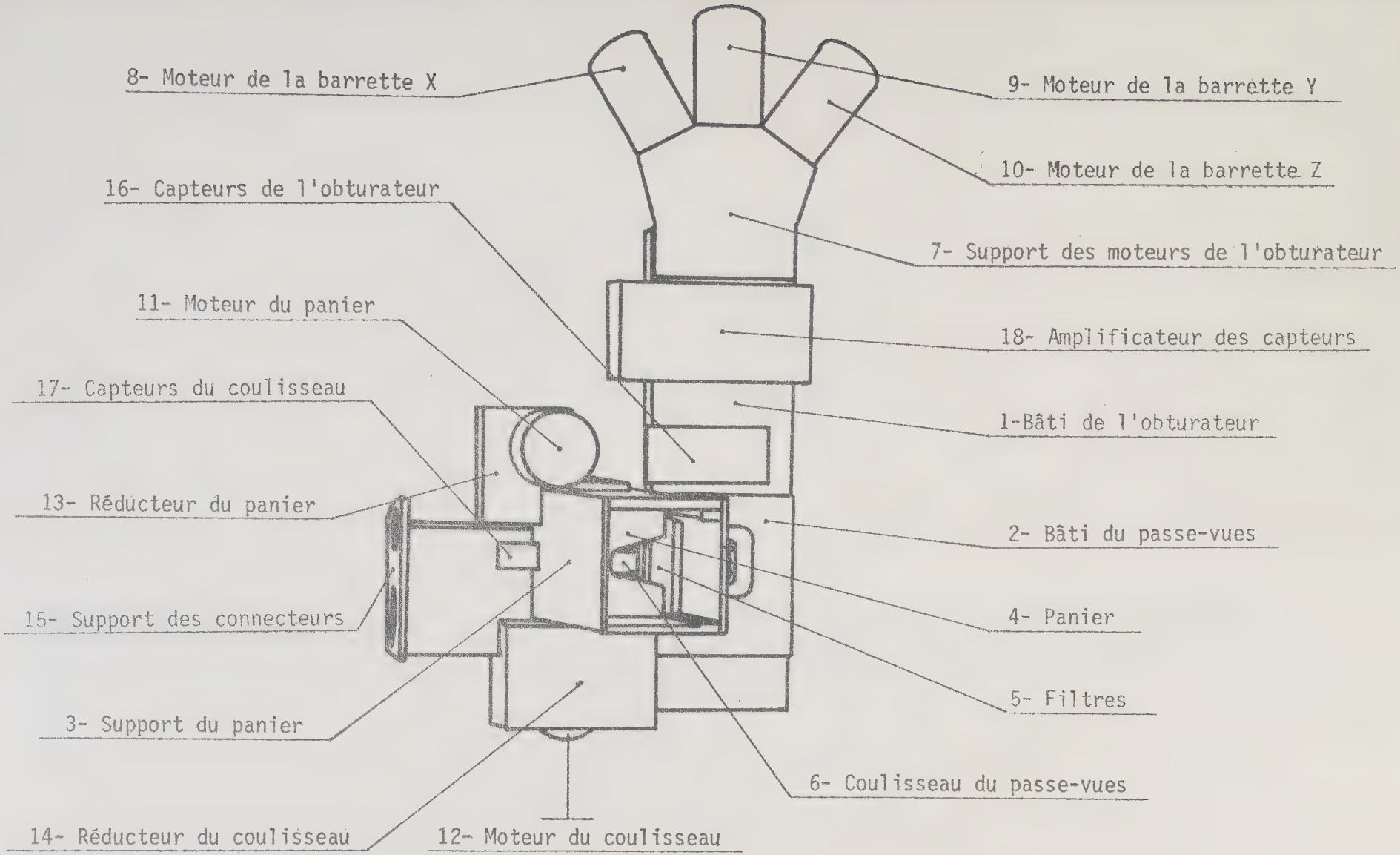
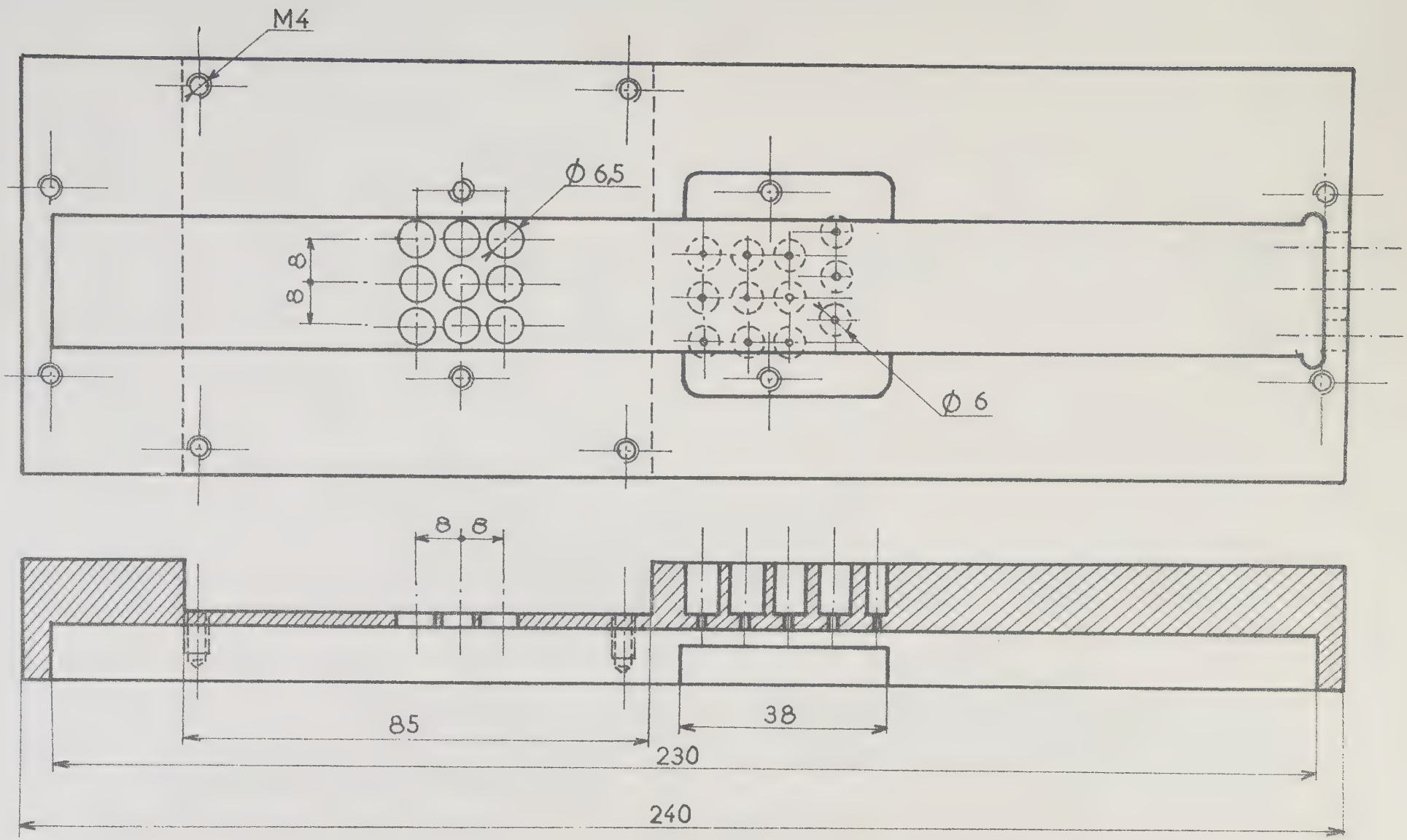
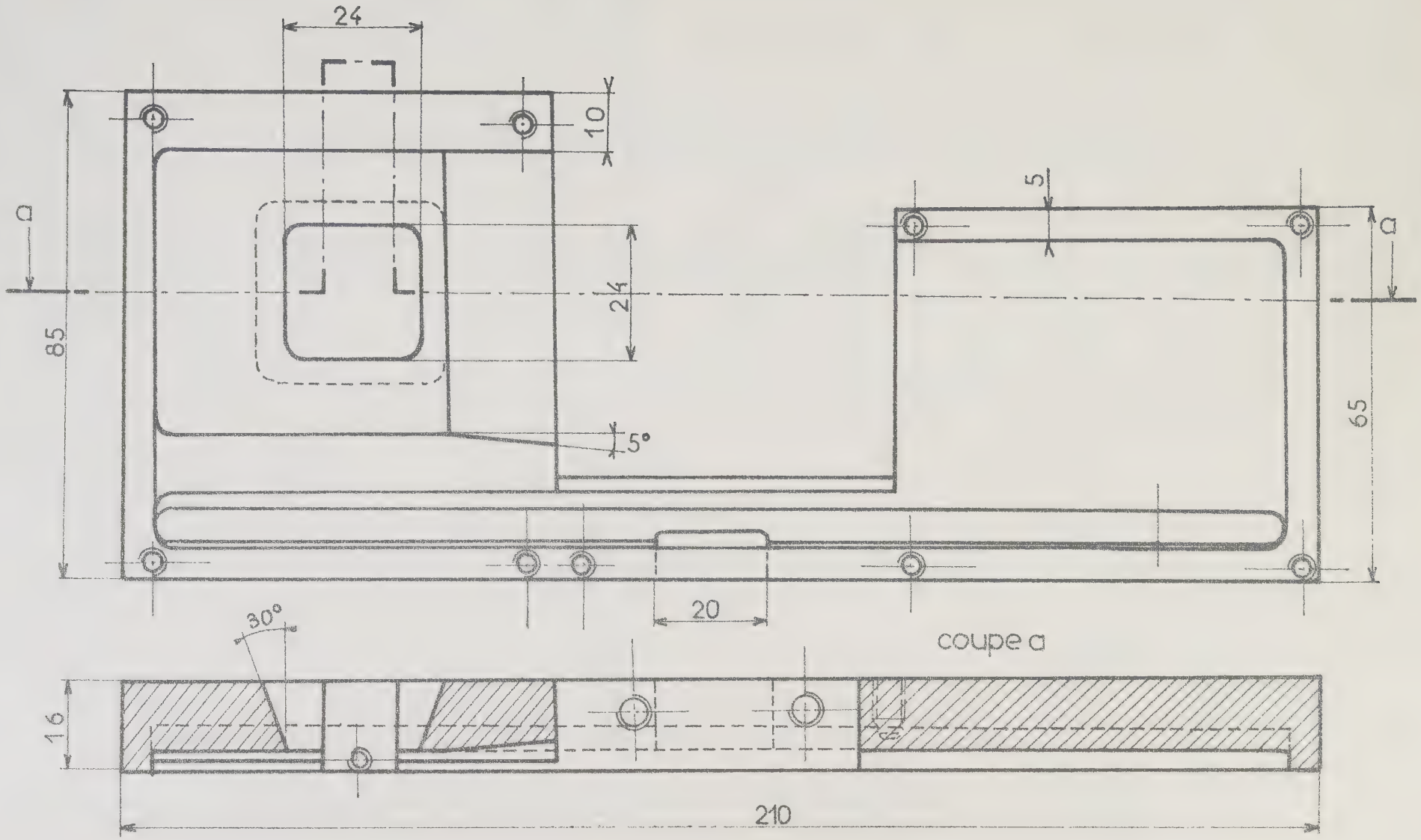


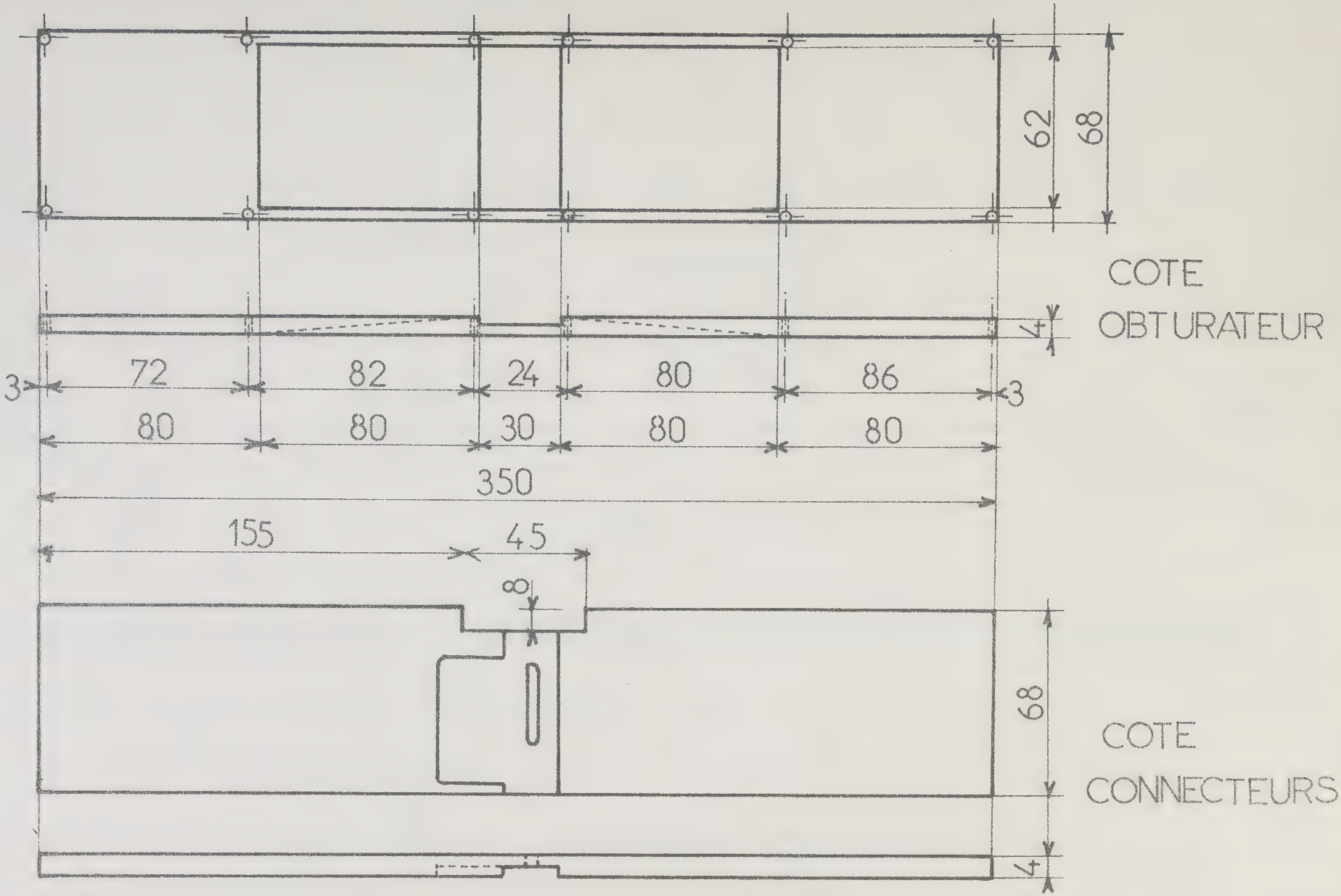
FIGURE A 2 : Schéma d'implantation des éléments mécaniques de l'unité active



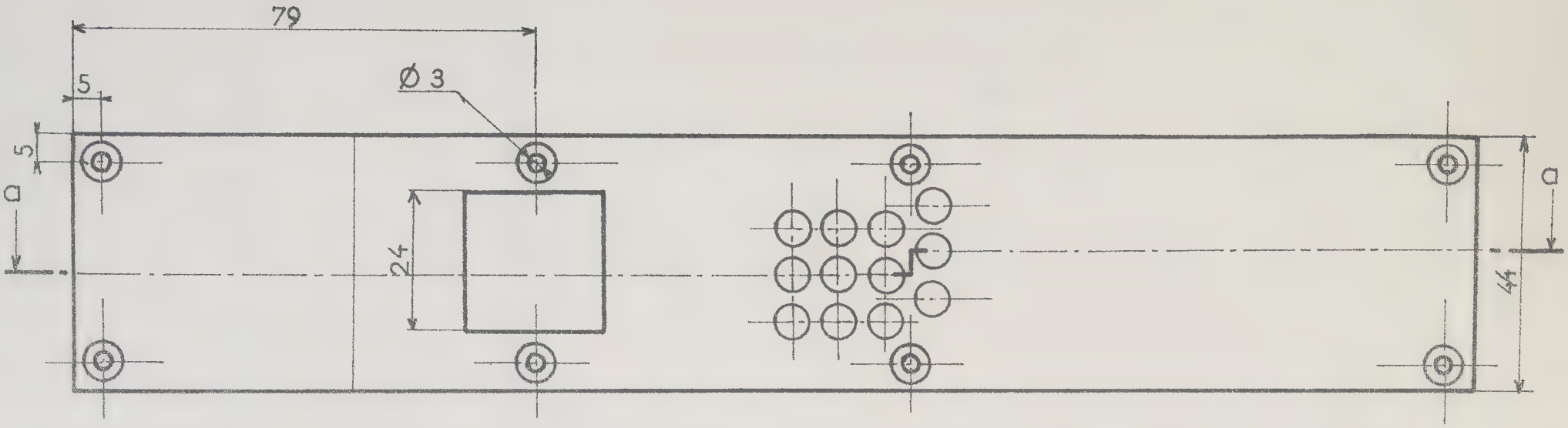
BOITIER OBTURATEUR (dural)



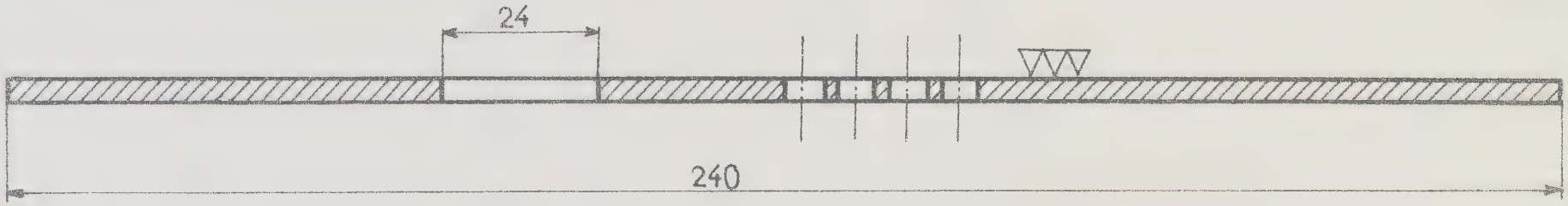
PASSE VUES (dural)



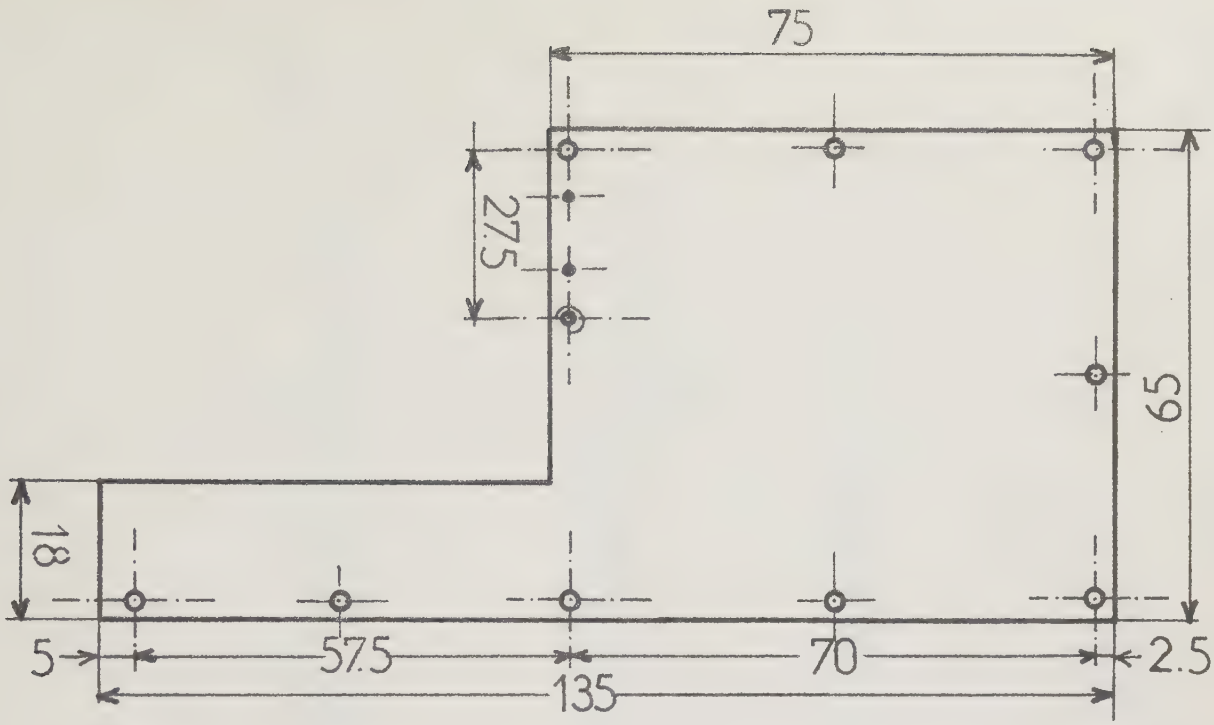
SUPPORT DU PANIER (dural)



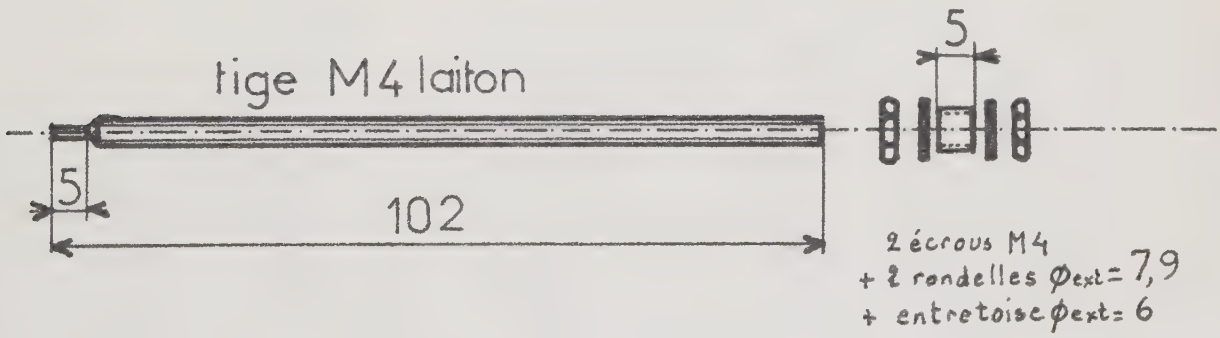
coupe a



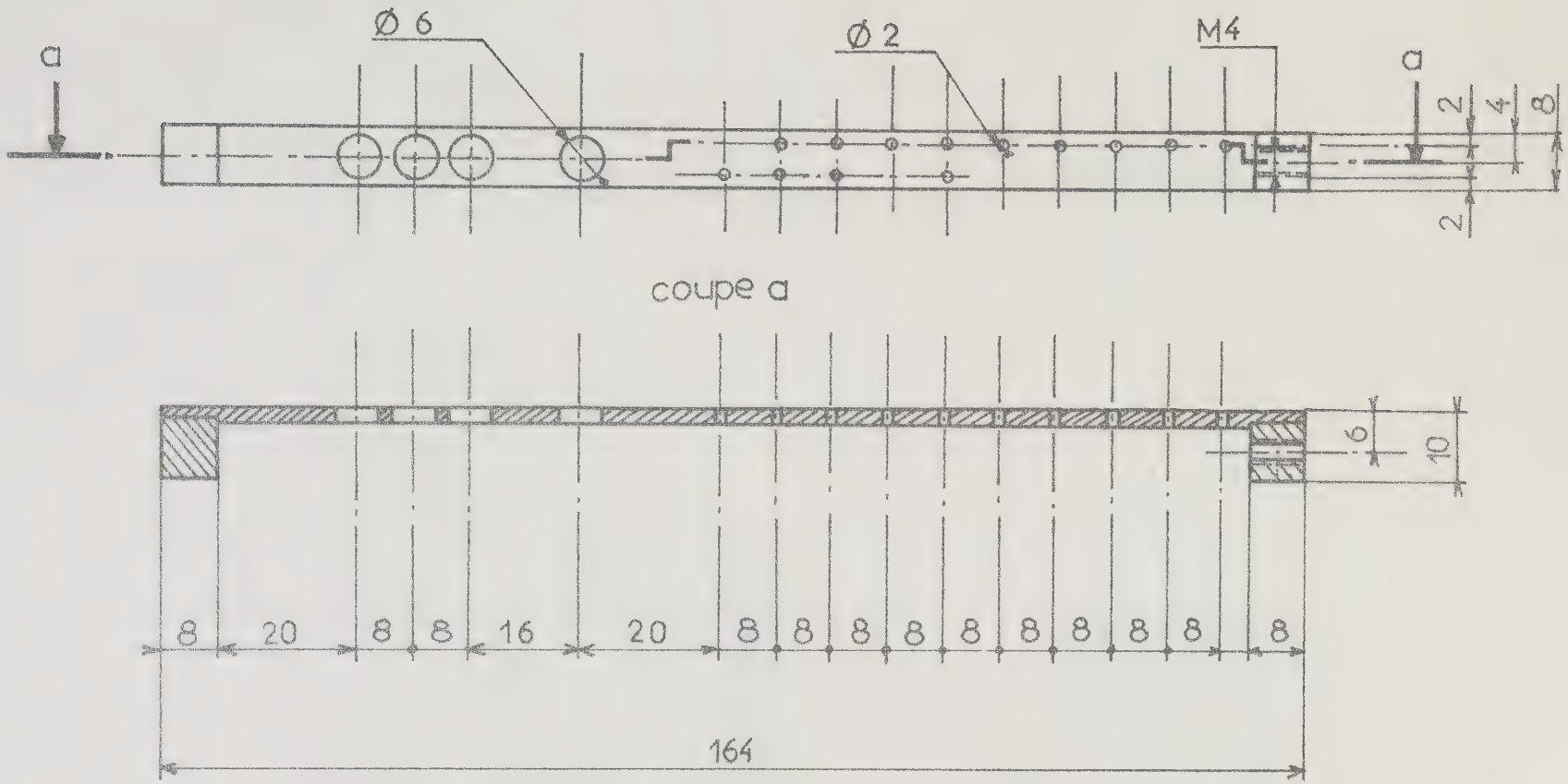
COUVERCLE OBTURATEUR (alu)



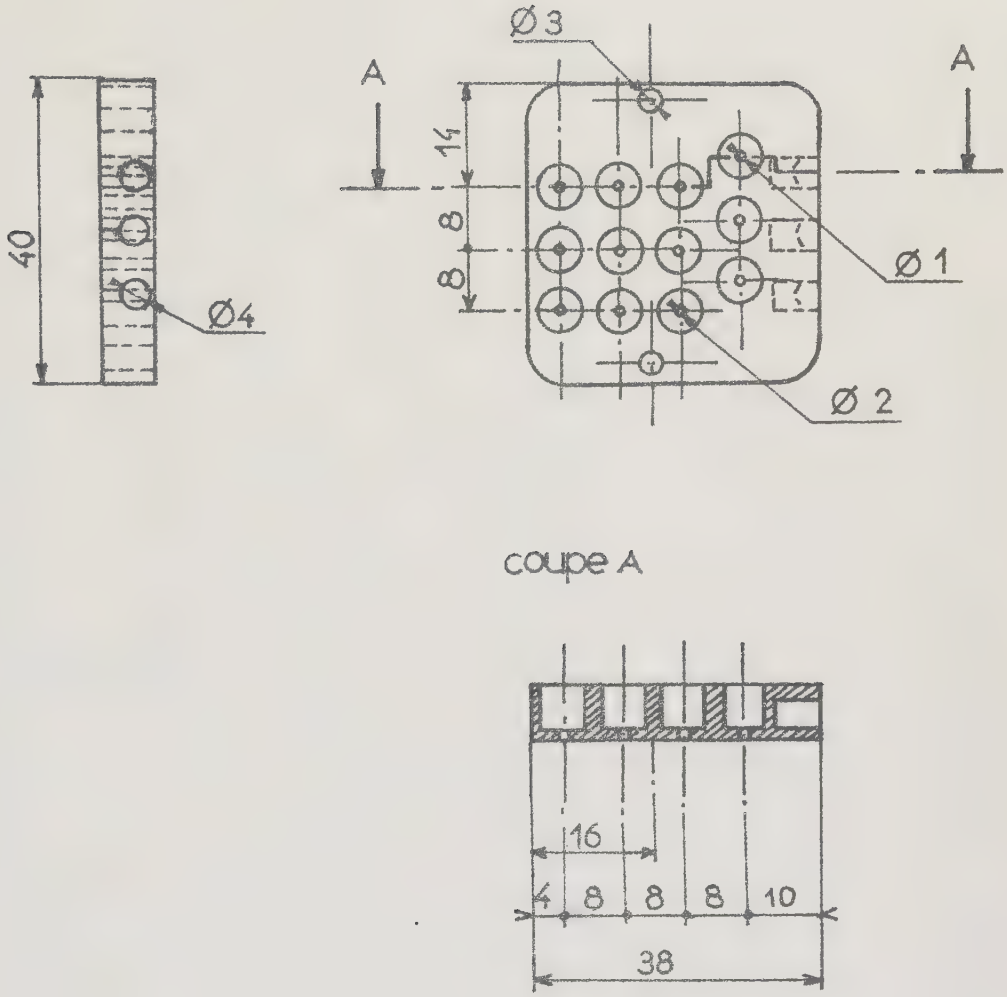
COUVERCLE DU PASSE-VUES.(alu)



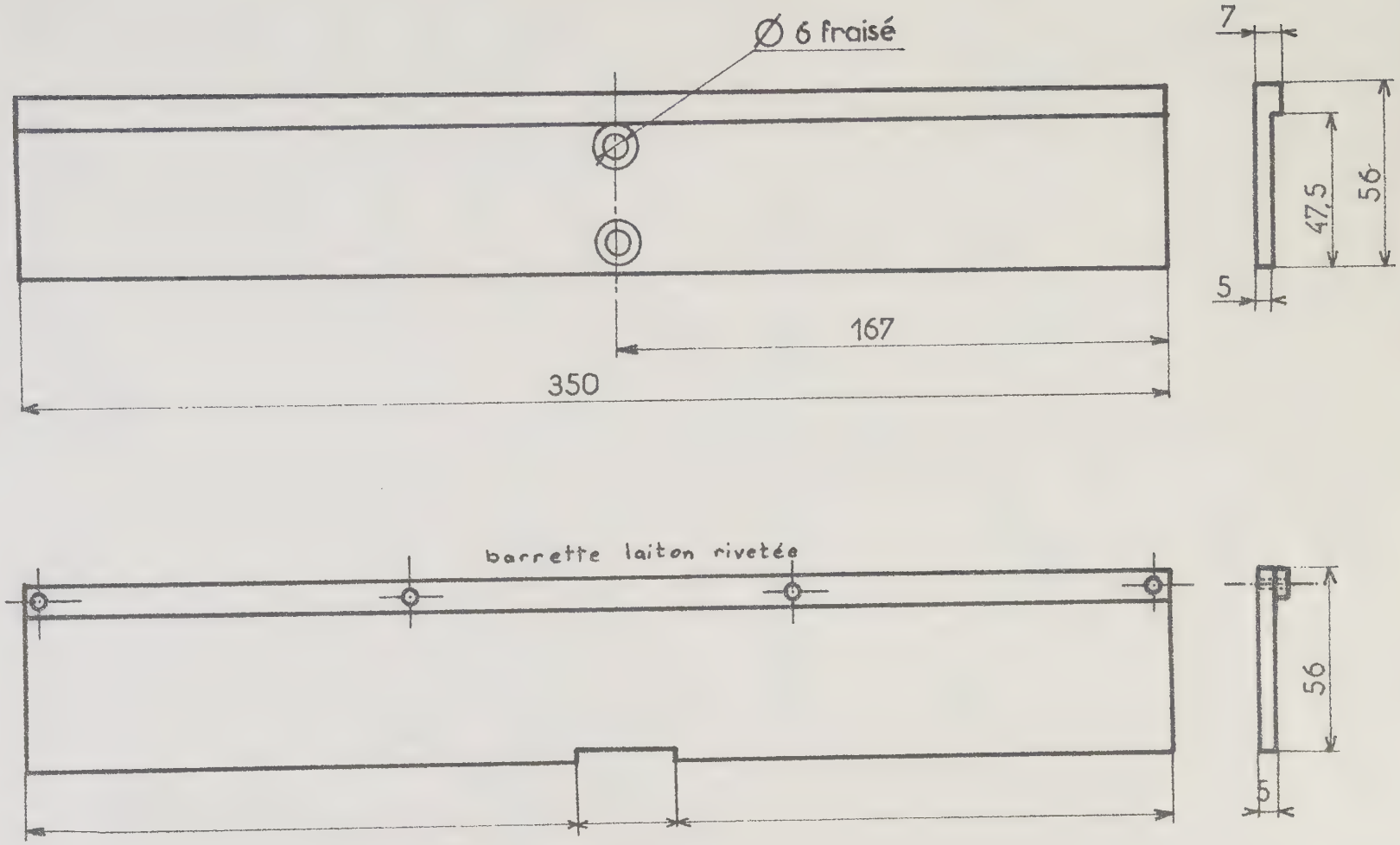
TIGE DE COMMANDE DE BARRETTE



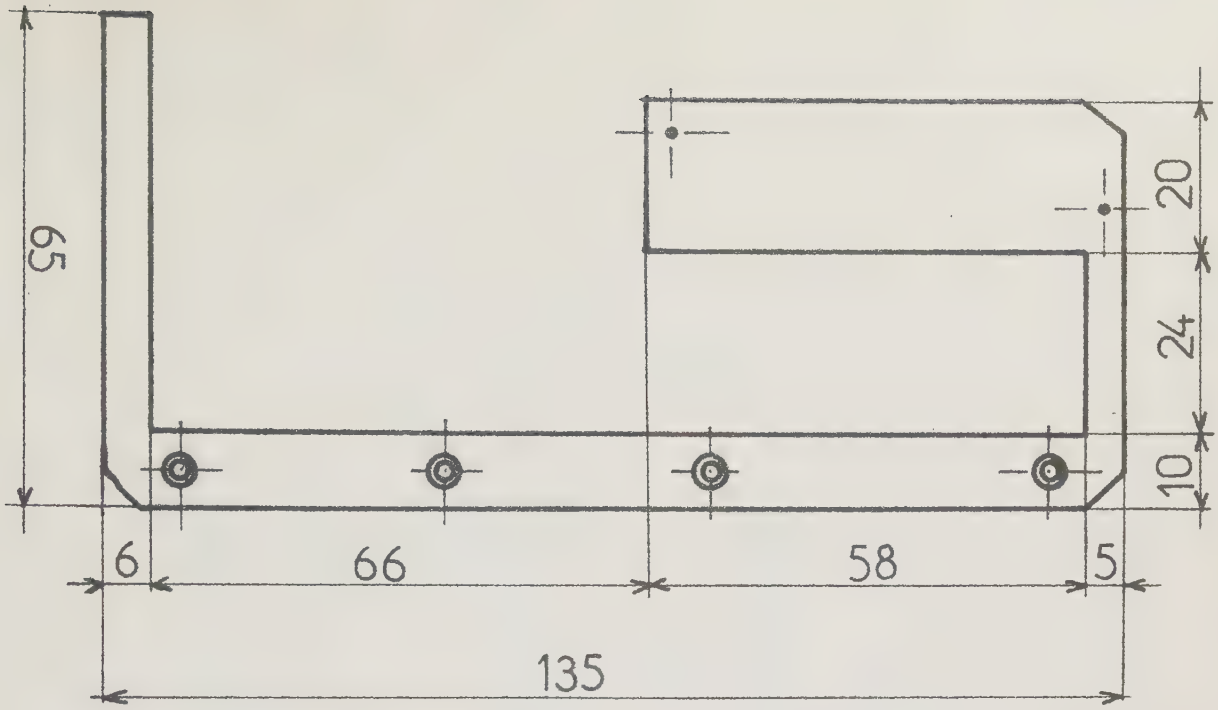
OBTURATEUR (laiton)



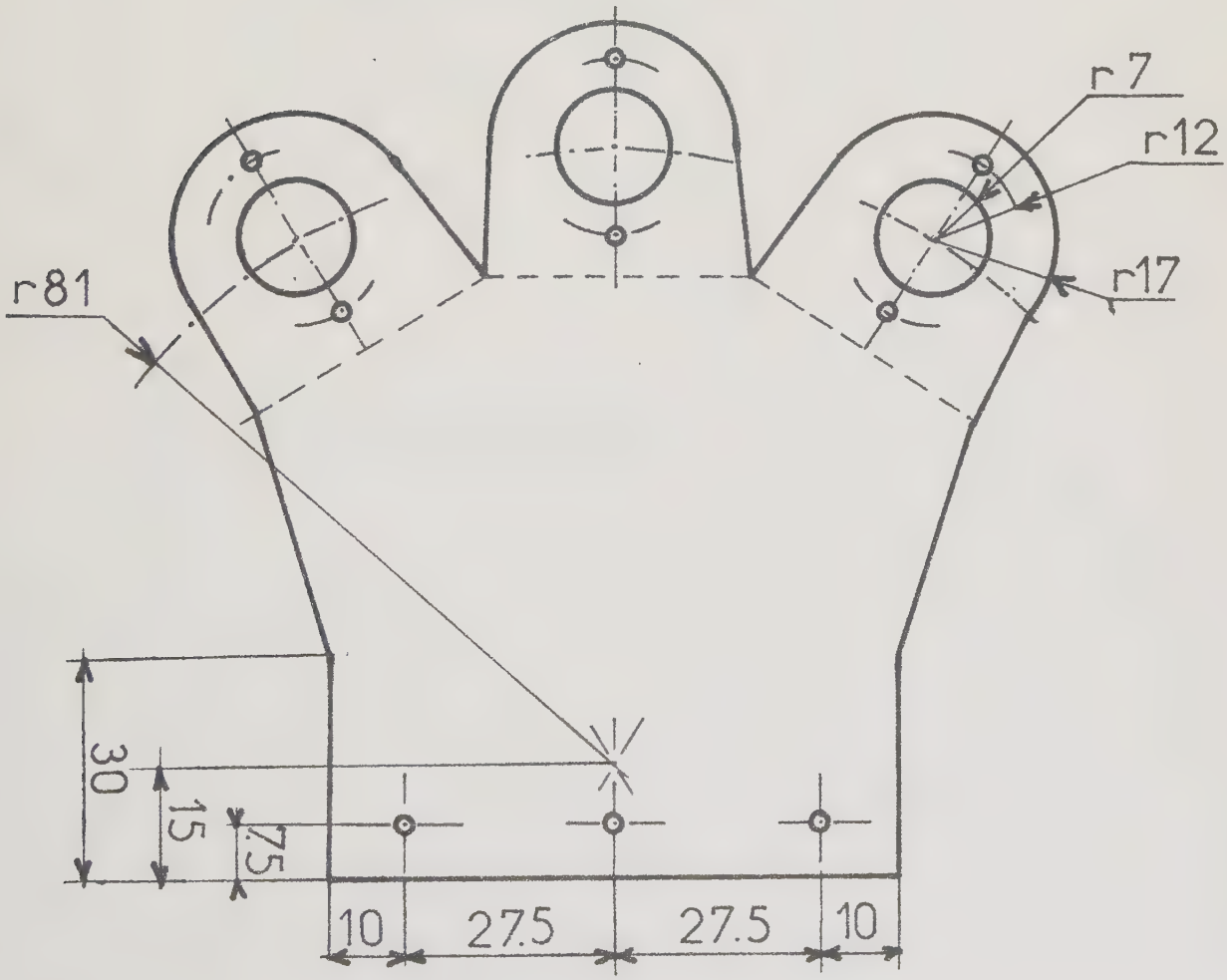
PALIER-GUIDE de lumiére (dural)



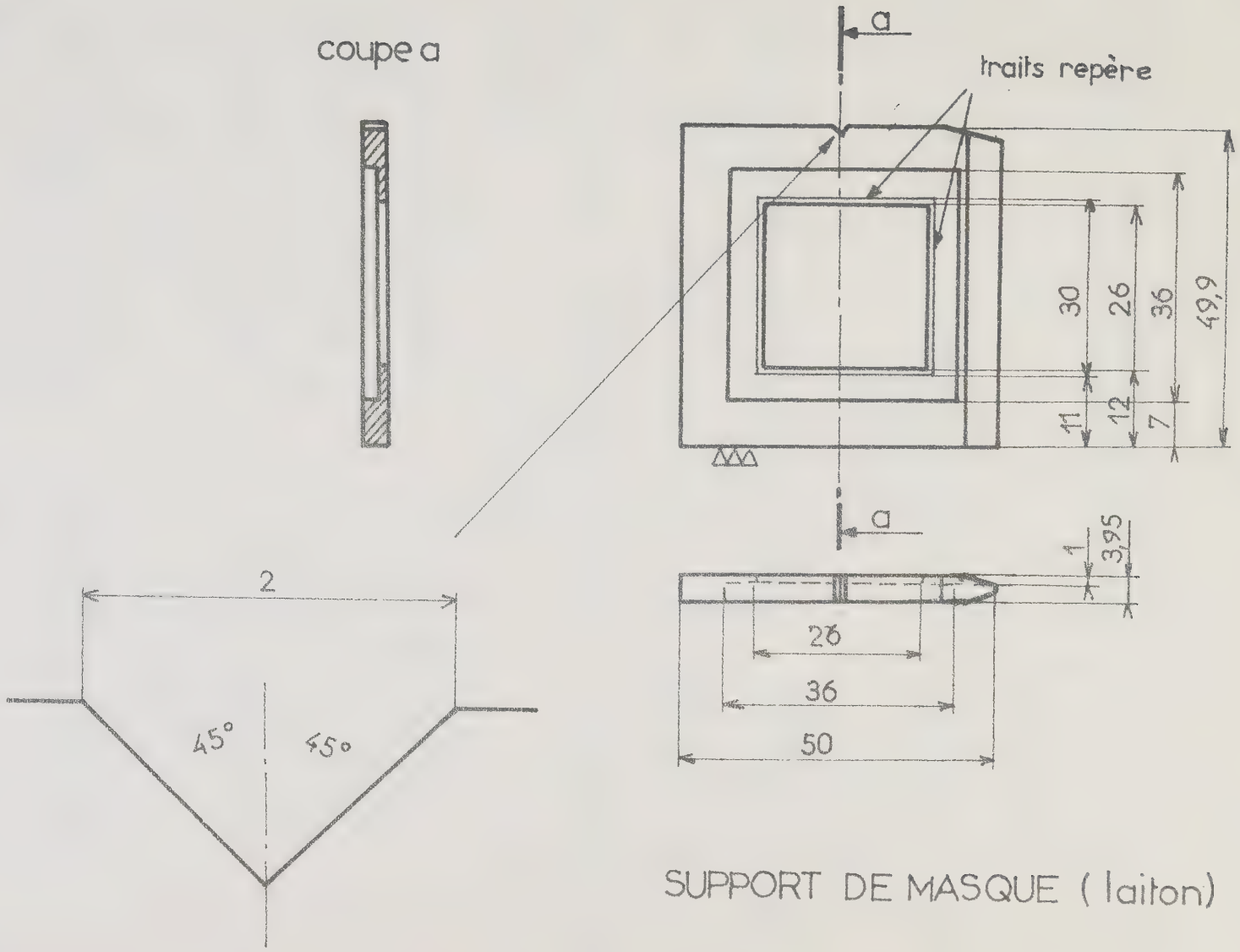
SUPPORT PANIER (haut, bas) (dural)



COULISSEAU (laiton 3mm)



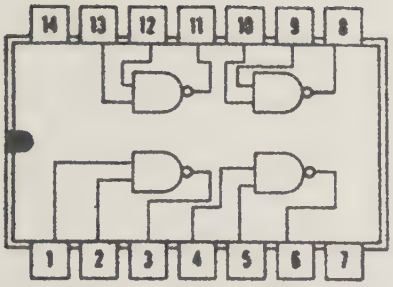
SUPPORT MOTEURS OBTURATEUR (alu 1.5mm)



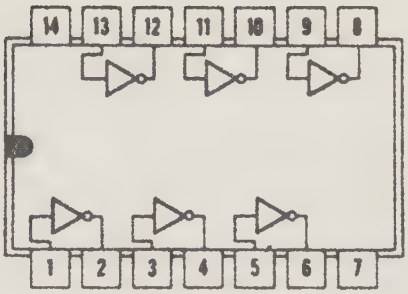
SUPPORT DE MASQUE (laiton)

A N N E X E I V

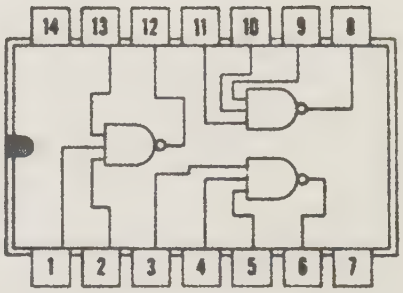
SCHEMAS DE BROCHAGE DES CIRCUITS INTEGRES UTILISES



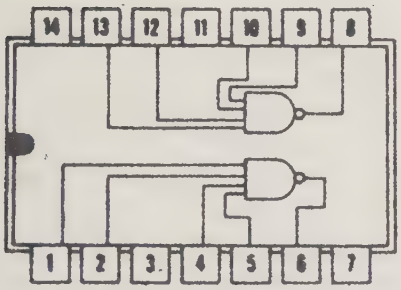
SN 7400 N



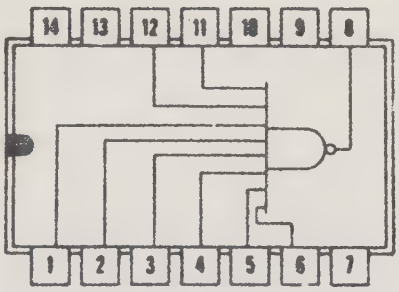
SN 7404 N



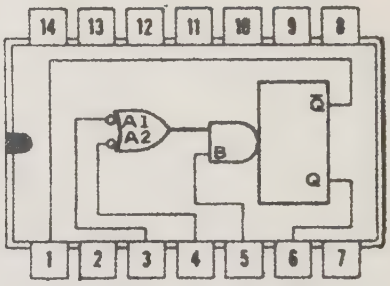
SN 7410 N



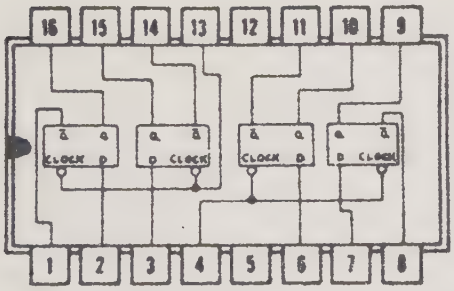
SN 7420 N



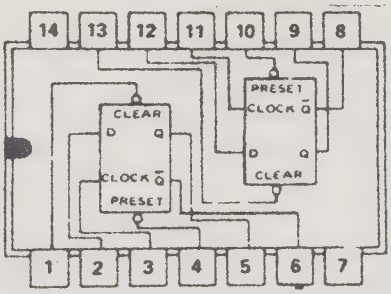
SN 7430 N



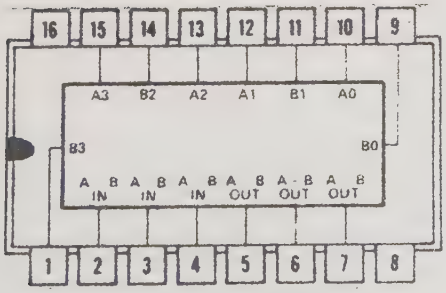
SN 74 121 N



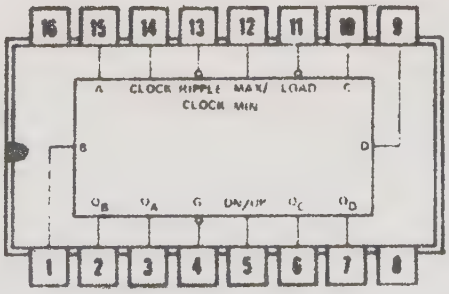
SN 7475 N



SN 7474 N



SN 7485 N



SN 74190 N

n° d'ordre : 72

Jury : MM. J.C. VIENOT Président

P. BOUSQUET
P. PARDO Examinateurs
J. BULABOIS

Vu et permis d'imprimer
Pour le Président de l'Université
Le Doyen de la Faculté des Sciences et des Techniques

L. CALATRY

Besançon, le